

다산과학기지 기반 지질-대기-생태 환경 변화 연구

Environmental Change Studies based on the Arctic Dasan
Station:
in terms of Geology, Atmospheric Science, and Ecology



극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “다산과학기지 기반 지질-대기-생태 환경변화 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 12.

연 구 책 임 자 : 이 유 경

참 여 연 구 원 : 우 주 선, 박 태 윤, 이 미 정



: 정 지 영, 김 민 철, 남 성 진

: 윤 영 준, 채 남 이, 이 종 익

: 이 흥 금, 최 문 영, 최 태 진

: 박 상 종, 이 태 식, 김 대 영

: 유 인 성, 백 종 민, 오 재 룡

: 최 용 회, 김 세 은, 박 기 헌

: 정 수 정, 경 혜 련, 정 소 망

: 이 제 인, Binu Tripathi

: 김 홍 규, 김 지 훈, 김 영 환

: 오 창 환, 문 정 진, 하 승 아

: 한 승 회, 박 상 범

: 이상민, Dierk Blomeire

위탁연구기관명 : 건국대학교

위탁연구책임자 : 양 영 현

위탁연구기관명 : 인천대학교

위탁연구책임자 : 서 명 지

위탁연구기관명 : 고려대학교

위탁연구책임자 : 조 석 주

보고서 초록

과제관리번호	PE16030	해당단계 연구기간	2014.01.01. ~ 2016.12.12	단계 구분	1단계 / 총 3단계
연구사업명	증 사업명	주요사업(기관목적사업)			
	세부사업명				
연구과제명	증 과제명				
	세부(단위)과제명	다산과학기지 기반 지질-대기-생태 환경변화 연구			
연구책임자	이 유 경	해당단계 참여연구원수	총 : 49 명 내부 : 33 명 외부 : 16 명	해당단계 연구비	정부: 3,530,643 천원 기업: 천원 계: 3,530,643 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지생명과학연구부	참여기업명			
국제공동연구	상대국명 : 프랑스 상대국명 : 노르웨이	상대국연구기관명 : 툴루즈대학 상대국연구기관명 : 노르웨이극지연구소(NPI)			
위탁 연구	연구기관명 : 전국대학교 연구기관명 : 인천대학교 연구기관명 : 고려대학교	연구책임자 : 양 영 헌 연구책임자 : 서 명 지 연구책임자 : 조 석 주			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	173
KOPI 극지연구소					
<ul style="list-style-type: none"> ○ 중앙로벤빙하 후퇴 지역에서 빙하 후퇴 시기 및 지형에 따른 토양 유기물과 식생, 미생물의 변화 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 다산과학기지 주변 로벤빙하 후퇴 지역의 빙하 후퇴 시기 및 지형에 따른 유기탄소지도 작성 - 로벤빙하 후퇴 지역의 빙하 후퇴 시기에 따른 식물 천이 파악 - 기후변화로 인한 로벤빙하 후퇴가 토양미생물 분포에 미치는 영향 분석 ○ 중앙로벤빙하 후퇴 지역의 대기 특성 이해 <ul style="list-style-type: none"> - 빙하후퇴와 지표면 특성 변화에 따른 대기-토양 간 대기 구성물질 교환량 변화 분석 ○ 다산기지주변과 스피츠베르겐섬의 고환경 특성 이해 <ul style="list-style-type: none"> - 퇴적암 연구를 통한 고생대 북극권 고환경 변화 복원과 지체구조운동, 기후변화 등 변화조절요인 연구 - 화석 동식물군 연구를 통한 고생태, 고지리 복원과 생물의 진화양상 연구 ○ 스피츠베르겐섬의 지질·광물·지구화학 특성 이해 <ul style="list-style-type: none"> - 초염기성암 카보나타이트 복합체에 대한 암석·광물·지구화학적 연구 - 맨틀 포획암 지구화학 특성연구를 통한 맨틀 진화 연구 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	빙하 후퇴 지역, 유기탄소지도, 퇴적상분석, 카보나타이트, 맨틀 포획암, 고생대 화석			
	영어	glacier foreland, soil organic carbon map, facies analysis, carbonatite, mantle xenoliths, Paleozoic fossils			

요 약 문

I. 제 목

다산과학기지 기반 지질-대기-생태 환경변화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 다산과학기지 주변 빙하 후퇴 지역에서 빙하 후퇴 시기 및 지형에 따른 대기·유기물·생태계 변화 파악
- 다산기지가 위치한 스피츠베르겐섬의 고환경 특성 및 지질·광물·지구화학 특성 이해

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 중앙로벤빙하 후퇴 지역에서 빙하 후퇴 시기 및 지형에 따른 토양 유기물과 식생, 미생물의 변화 파악
- 중앙로벤빙하 후퇴 지역의 대기 특성 이해
- 다산기지주변과 스피츠베르겐섬의 고환경 특성 이해
- 스피츠베르겐섬의 지질·광물·지구화학 특성 이해

IV. 연구개발결과

- 빙하후퇴지역의 토양 유기탄소 지도 작성
- 빙하후퇴시기 뿐만 아니라 토양 pH나 표면온도와 같은 환경요인들도 빙하후퇴지역 토양 세균 군집구조를 결정하는 데 큰 역할을 수행함을 밝힘
- 빙하후퇴시기에 따라 세균 군집의 생리학적 특성 중의 하나인 rRNA operon copy number가 감소함을 밝힘
- 브뢰기반도의 주요 지질단면에 대한 정보를 제공하는 지도 발간

V. 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구를 토대로 니알슨 기반 육상 모니터링 분야(Terrestrial Flagship) 지속 참여
- 본 연구 결과를 토대로 북극이사회와 북극과학위원회가 공동 수행하는 SAON (지속가능한 북극 관측 네트워크)에 북극 모니터링 활동 보고

S U M M A R Y

I. Title

Environmental Change Studies based on the Arctic Dasan Station: in terms of Geology, Atmospheric Science, and Ecology

II. Purpose and Necessity of R&D

- Understanding of changes in atmosphere, pedosphere, and biosphere along a glacial chronosequence and microtopography in the forefield of Midtre Lovénbreen
- Paleoenvironmental interpretations, and geological, mineralogical, and geochemical researches of Spitsbergen

III. Contents and Extent of R&D

- Changes in soil organic carbon (SOC), vegetation, and microbial community along a glacial chronosequence and microtopography in the forefield of Midtre Lovénbreen
- To understand the characteristics of atmospheric compositions
- Paleoenvironmental research of Spitsbergen
- To understand evolution of subcontinental lithospheric mantle and characterization of geology and mineralogy of Spitsbergen

IV. R&D Results

- Map soil organic carbon of glacier retreat.
- Environmental factors not only glacier retreat period, soil pH or surface temperature but also bacterial community play a big role in soil of glacier retreat region.
- One of the physiological characteristic of microbial community shows that rRNA operon copy number diminished with time of glacier retreat period.
- Provide a geographic map of the Barentsburg/Beerenberg/the Bear Island

V. Application Plans of R&D Results

- Understanding impacts of glacier retreat on terrestrial ecosystems in high Arctic under climate change and reporting the data to Terrestrial Flagship in NySMAC
- Reporting the monitoring activities to SAON(Sustaining Arctic Observing Networks) that was initiated by the Arctic Council and International Arctic Science Committee

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	11
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	13
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	18
Section 1 Soil Organic Carbon, Vegetation and Microbe variation	
across Different Glacial Retreat Periods and Topography	18
1. Vegetation, Soil Organic Carbon and Bacterial community change in the Glacier Foreland of Midtre Lovénbreen	18
2. Vegetation Mapping	28
3. Soil Organic Carbon Map of in the Midtre Lovénbreen Foreland	36
4. Succession of Microbial Community in the Glacier Foreland of Midtre Lovénbreen	54
5. Research on Endolithic microbial community	64
Section 2 Atmospheric Characteristics in Midtre Lovénbreen Foreland	82
1. Gas exchange between Atmosphere and soil in Midtre Lovénbreen Foreland	82
2. Gas Sampling and Carbon Dioxide Measurement in the Field	86
Section 3 Late Paleozoic Stratigraphy and Palaeoenvironment by Dasan	87
1. Late Paleozoic Stratigraphy	87
2. Late Paleozoic Sedimentary Facies	106
3. Diversity and Evolution of Late Paleozoic Brachiopod	116
4. Pelaeoecology of Late Paleozoic Sessile Animal	119
5. Preliminary Fieldwork on Paleozoic Strata of Spitsbergen	132
6. Fieldwork on Paleozoic Strata of Greenland	137
Section 4 Geochemistry of Mantle Xenolith from Spitsbergen	139
1. Introduction	139
2. Geological Environment and Sample Collection	140
3. Petrogeochemical Characteristics of Mantle Xenolith from Sverrefjell	142
4. Discussion and Conclusion	153

Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute	155
Chapter 5 Application Plans of R&D Results	159
Chapter 6 Information of Overseas Science Technology from research development processes	161
Chapter 7 References	169



목 차

제 1 장 서론	11
제 2 장 국내외 기술개발 현황	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	18
제 1 절 빙하후퇴 시기 및 지형에 따른 토양 유기물과 식생, 미생물 변화 파악	18
1. 중앙로벤빙하 후퇴지역 식생, 유기탄소, 미생물 조사	18
가. 조사 지점 선정, 방법 및 결과	18
2. 식생분포 지도 제작	28
가. 식생자료와 환경자료 이용 빙하후퇴지역 내 식생지도 작성X	28
나. 다변량 분석	29
다. 식생과 샘플링 지점의 계층적 분류	30
라. 식생지도 작성	35
3. 중앙로벤빙하 후퇴지역 유기탄소 지도	36
가. 토양 유기탄소 농도 및 토양 특성 분석	36
나. 토양 유기탄소 농도 분석	37
다. 토양 가비중(bulk density) 분석	37
라. 토성 분석	37
마. 토양 특성 분석	37
바. 단위면적당 토양 유기탄소 저장량 계산	46
사. 토양 유기탄소 지도 작성	49
4. 중앙로벤빙하 후퇴지역 미생물 군집 특성 조사	54
가. 미생물 군집 분석을 위한 중앙로벤빙하 후퇴지역 토양 샘플 선정	54
나. 빙하후퇴 시기에 따른 토양 세균 군집과 다양성 변화 패턴 분석	54
다. 토양 세균 군집과 환경인자 간의 상관관계 분석	56
라. 미생물 생물량 정량분석	56
마. Metagenome sequencing을 통한 빙하후퇴 시기에 따른 토양 세균 군집 종 구성과 기능 변화 분석	57
바. 동로벤 빙하 후퇴지역 토양 세균 군집 분석	59
5. 암석 미생물 연구	64
가. 2014년 북극 다산과학기지 주변 암석시료 확보	64

나. 2014년 암석 시료 확보 지역에 온도 측정 장치 설치	67
다. 2014년 암석시료 미생물 군집 분석	67
라. 2015년 북극 다산과학기지 주변 암석시료 확보	71
마. 2014년 설치된 온도 데이터 확보용 iButton 수거 및 데이터 분석	71
바. 환경 데이터 수집용 HOBO logger 설치	74
사. 암석 미생물 연구 적합 지역 탐색	75
아. 2016년 북극 다산과학기지 주변 암석시료 확보	76
자. 환경 데이터 수집용 HOBO logger 수거 및 데이터 획득	77
차. 암석과 암석 미생물 군집 구조의 연관성	77
카. 암석 미생물의 계통 발생적 유연관계 분석	78
제 2 절 중앙로벤빙하 후퇴지역의 대기 특성 이해	82
1. 빙하 후퇴 지역 대기-토양 온실기체 교환 현장연구 수행	82
가. 중앙로벤빙하 후퇴 지역에서의 토양 이산화탄소 플럭스 관측	82
나. 중앙로벤 빙하 지역에서의 토양 이산화탄소 플럭스 및 환경 인자 관측 결과	83
2. 현장 포집 기체의 이산화탄소 가스 농도 측정	86
가. 이산화탄소 농도 측정을 위한 현장 기체 포집	86
제 3 절 다산기지주변 고생대 층서 및 고환경 규명	87
1. 다산기지주변 후기고생대 층서	87
가. 다산기지 주변 지질개요	87
나. 다산기지 주변 후기고생대 층서	88
다. 다산기지 주변 주요 단면	90
라. 연대관련 자료	103
마. 층서재정의	104
2. 다산기지주변 후기고생대 퇴적상	106
가. 현미퇴적상 분석	108
나. 온코이드(oncoid) 퇴적상	113
3. 다산기지주변 후기고생대 완족동물의 다양성과 진화	116
가. 완족류 화석군의 계통 분석	116
나. 완족류 화석의 수렴진화	117
다. 고생대 삼엽충을 이용한 삼엽충 머리 마디구조 규명	118
라. 산처리 시료에서 다양한 형태의 미화석 분리	118
4. 다산기지주변 후기고생대 고착성 동물의 고생태	119

가. Palaeoaplysina 생물초의 구조와 고생태	119
나. Tabulate coral의 분류와 고생태	126
5. 스피츠베르겐 고생대 연구지 사전답사	132
가. 1차년도 조사	132
나. 2차년도 조사	134
6. 그린란드 고생대 지층 현장답사	137
제 4 절 스피츠베르겐섬 맨틀 포획암의 지구화학 특성연구	139
1. 서 론	139
2. 지질환경 및 시료채취	140
3. 스베르피엘(Sverrefjell) 맨틀포획암의 암석·지구화학적 특징	142
가. 암석학적 특징	142
나. 분석방법 및 결과	145
다. 전암 및 광물 지구화학 조성	148
라. Sr-Nd-Pb 동위원소 조성	152
4. 토의 및 결론	153
제 4 장 연구개발 목표 달성을 위한 대외기여도	155
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	159
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보	161
제 7 장 참고문현	169



제 1 장 서론

기후변화와 함께 전 세계적으로 빙하 후퇴의 속도 및 빙하 용해 양이 매우 빠른 속도로 증가하고 있다. 빙하의 변화는 전지구의 해수면 상승, 지역적 수문학적인 순환 변화 및 산사태 등의 문제를 야기하기도 한다. 이와 더불어 빙하가 사라지며 새롭게 드러나는 토양에서는 새로운 생물들이 정착하고 토양 발달이 시작된다. 빙하로부터의 거리가 빙하 후퇴의 시기(토양의 연대)를 반영할 수 있는 특성 때문에 빙하 소멸지역은 생태계의 변화를 한 번에 관찰할 수 있는 적합지이다.

토양 유기물(soil organic matter)은 토양 내에 존재하는 식물이나 동물, 미생물에서 유래한 다양한 분해 단계를 가지는 유기 물질을 뜻한다. 유기물은 토양 질량의 약 1~5% 정도의 비율을 차지하지만, 토양 내에서 다양한 기능을 담당한다. 물리적으로 입자들을 결합하여 입단(aggregate)형성에 도움을 주고, 물과 공기의 흐름을 조절한다. 화학적으로는 토양의 pH, 이온 교환, 영양염류 가용성 등을 결정하는데 기여한다. 생물학적으로는 분해, 에너지와 영양분 공급, 미생물 활성과 관여되어 있다. 유기물은 토양 생태계의 다양한 기능에 영향을 미치기 때문에, 유기물의 특성, 즉 유기물의 구성이 어떻게 되어있는가는 연구자들의 주된 관심의 대상이 되어 왔었다. 이처럼, 생태계의 기본 구성 요소인 토양 및 토양 유기물의 변화 연구는 기후변화에 따른 육상 생태계 변화를 감지하기 위한 필수적이다.

빙하 후퇴지역에서 토양 발달과 식물 천이에 관한 많은 연구가 있어왔던 반면, 이 지역의 탄소 순환 및 미생물 연구는 아직 미비한 단계이다. 따라서, 빙하가 후퇴한 후 식생, 미생물 천이와 토양 발달로 인해, 이 지역이 토양이 탄소의 공급원(source)인지, 저장원(sink)으로 역할을 할지, 시간에 따라 역할이 어떻게 달라지는지, 탄소 순환의 패턴이 달라지는지, ‘탄소’원소를 중심으로 한 기후-식생-토양 피드백에 대한 연구가 매우 필요한 실정이다.

빙하가 후퇴한 지역은 영양분과 에너지 부족, 저온, 이용 가능한 수분 부족 등으로 생물이 살아가기에 매우 혹독한 환경인 빙하 아래 지역이 지면이 노출되는 토양으로 변하는 아주 새로운 환경이다. 이러한 환경 변화가 빙하 아래 지역에서 살아가던 생물에게 어떤 변화를 줄 것인지에 대한 우리는 아직 제대로 이해하지 못하고 있다. 빙하후퇴에 따른 육상 생태계의 생물학적 천이과정은 토양 미생물의 유입과 성공적인 안착에서부터 시작되는바, 토양 미생물상의 천이양상과 발생 메커니즘에 대한 이해 또한 필수적이라 할 수 있다.

또한 북극은 남극과 더불어 지구에서 달이나 화성의 유사환경으로서 우주생물학적 연구 가치가 높은 지역이며, 암석 미생물 연구로 화성과 같은 지구 밖 행성에서 생명의 존재 가능성을 추측할 수 있을 것으로 기대한다.

지질학적인 측면에서는 다산기지가 있는 브뢰기반도가 포함된 스피츠베르겐 서쪽은 신생대(제3기) 지체구조운동에 의한 압축력에 의해 북서-남동 방향으로 발달한 단층과 습곡이 집중되어있으며 서스피츠베르겐 습곡-스러스트대(West Spitsbergen Fold-and-Thrust Belt)라고 불린다(Saalmann and Thiedig, 2002). 이 변형작용은 칼레도니안 변성작용을 받은 기반암과 그 위에 쌓인 퇴적암에 모두 영향을 끼쳤다. 현재는 서로 인접해 있는 퇴적층일지라도, 퇴적당

시에는 상대적으로 먼 거리에 위치해 있었던 것이다. 이 때문에, 각 스러스트에 존재하는 퇴적 암층은 서로 다른 특징을 가지고 있으며, 상세한 주상도 작성 및 연대 측정을 통한 층서 재구성 연구는 고환경을 비롯한 퇴적학적·고생물학적 연구에 중요한 활용 자료가 될 수 있다.

지구 화학적 측면에서는 스피츠베르겐섬은 스발바르군도 서측에 위치하며 제4기 화산활동에 의해 지표로 분출한 알칼리 현무암에는 다수의 맨틀포획암이 포함되어 있다. 노르웨이 북쪽 북대서양과 유라시아 해양분지(Eurasian (Arctic) oceanic basins) 사이에 위치하고 있는 스발바르군도는 북대서양이 현재의 상태로 완전히 열리기 전까지는 그린란드와 인접하여 붙어 있는 로라시아 대륙의 일부였으나 백악기 말-네오기 시기 동안의 유라시아판과 북아메리카판의 분리로 해양판의 확장이 진행되면서 현재의 위치에 자리잡게 되었다고 알려져 있다(Blythe & Kleinspehn, 1998). 따라서, 스발바르군도의 스피츠베르겐섬 맨틀포획암은 그린란드지역의 시생대 순상지 기반암을 관입한 초염기성암의 맨틀포획암이 보존하고 있는 지구형성 초기의 맨틀 성분에 대한 정보와 함께 올리고세 이후 해양판의 확장과정에서 발생한 암석권 맨틀 진화과정에 대한 정보를 모두 포함하고 있을 가능성이 높다. 또한 스피츠베르겐섬은 니포비치 해령(Knipovich Ridge)과 객켈 해령(Gakkel Ridge)에 가깝게 위치하고 있어 이 지역 대륙판을 뚫고 올라온 맨틀파편으로 볼 수 있는 스피츠베르겐 맨틀포획암의 암석권 맨틀진화과정에 대한 정보는 니포비치해령과 객켈 중앙해령 현무암이 유래한 맨틀의 지구화학적특성과 진화과정 해석에 중요한 정보를 제공해 줄 수 있다.

이와 같이, 빙하후퇴지역의 토양유기물 특성, 식생, 미생물 변화를 비롯하여 이 지역의 대기특성을 이해하고 더불어 스발바르 지역의 퇴적층과 암석 연구를 통한 고환경, 지질, 광물, 지구화학적 특성 이해는 과거로부터의 기후변화 과정과 현재 진행되고 있는 기후변화로 인한 생태계 변화를 종합적으로 이해하는데 중요한 자료로 활용될 것으로 기대한다. 따라서 본 과제에서는 지구상에서 가장 급격하게 빙하가 사라지는 브뢰기 반도에서 기후변화로 인한 지질-대기-생태 환경이 어떻게 변하는지 이해하고자 한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국내외 기술 수준

가. 세계적 수준

개념정립 단계	●	기업화 단계	기술 안정화 단계	
---------	---	--------	-----------	--

- 2008년 시작된 노르웨이 극지연구소의 CryoClim에서 스발바르 빙하의 시기별 넓이를 보여주는 Glacier Area Outline과 빙하를 빙하 얼음, 중첩 얼음, 만년설 빙하로 구분하여 보여주는 Glacier Surface Type 제작
- 10여 년 전 중앙로벤빙하 소멸 지역에서 빙하 소멸 시기, 미세 지형, 교란 등 환경 요인을 고려하여 식물 분포도를 작성한 반면(Moreau et al., 2005), 빙하 소멸 지역의 미생물 유입원과 유입경로에 관한 연구는 부족한 실정임
- 빙하 소멸 지역 토양 미생물 천이 과정의 계절적 변동에 관한 연구는 거의 진행된 바 없음(Lazzaro et al., 2012)
- 지금까지의 브뢰기반도의 빙하 소멸 지역 연구는 일부 빙하에 대해 10여 년 전 대상법을 통한 부분적인 샘플링으로 이루어졌을 뿐(Nakatsubo et al., 2005), 후속연구와 통합적인 연구는 진행된 바 없음
- 이태리-독일 연구팀이 빙하 용융수의 유입이 콩스피오르드 연안 해수의 화학적 조성에 미치는 영향 연구 중(RIS 10527)

나. 국내수준

- 선행연구(주요사업)를 통해 브뢰기반도 14개 빙하 중 하나인 중앙로벤빙하에서 빙하 소멸 시기와 지형 및 교란과 관련하여 식물 및 유기탄소 분포도를 작성하고 세균 군집 구조 연구 수행(Kwon et al. 2015)
- 극지연구소의 PAP 사업으로 중앙로벤빙하에서 빙하 융해로 대기 중으로 배출하는 이산화탄소 변화 분석(류종식 박사)과 빙하 소멸 시기에 따른 토양 진균(fungi)의 종 변화 양상 연구 수행(조나단 아담스 교수, Dong et al. 2016)
- 다산과학기지 주변 연안에 서식하는 규조류와 해조류의 분류학적 연구(Choi et al. 2008), 성계와 갈조류 중금속 축적 분석(Ahn et al. 2009), 식물성 플랑크톤의 UV 흡수물질 연구(Ha et al. 2012), 원격탐사 활용 해색 연구 수행(Kim et al. 2014)
- 극지연구소 정책사업 ‘북극 다산과학기지 기반 연구 활성화를 위한 정책 연구’를 통해 니알슨 기지 운영 국가의 연구 성과를 분석하고, 다학제 국제공동연구에 전략적으로 참여할 방안 수립

2. 국내외 연구현황



가. 국내 동향

- 극지연구소 주요사업을 통해 중앙로벤빙하 후퇴지역에서 빙하 후퇴 시기, 미세 지형, 교란 등 환경 요인과 관련하여 식물 분포도 및 유기탄소의 분포도 작성 및 미생물 군집 구조 연구 수행 (Kwon et al. 2015)
- 상기 주요사업을 통해 브뢰기 반도 주변 빙하 기반암에서 산출된 완죽동물을 이용해 기반암 층서 규명 (Lee et al., 2016; Lee and Guang, 2016)
- 후기고생대 퇴적암의 층서 재정립과 현미퇴적상 고생물을 이용한 퇴적환경 규명, 완죽동물 등 화석을 이용한 생물의 진화와 기능 등 고생물학적 연구
- 극지연구소의 PAP 사업(과제책임자 류종식 박사)으로 중앙로벤빙하 후퇴지역에서 빙하 융해로 대기 중으로 배출하는 이산화탄소 변화 연구
- 극지연구소 PAP 사업(과제책임자 조나단 아담스 교수)으로 중앙로벤빙하 후퇴지역을 대상으로 빙하 후퇴시기에 따른 토양 진균의 종변화 양상 연구 수행 (Dong et al. 2016)
- 극지연구소 정책사업(과제책임자 이유경) ‘북극 다산과학기지 기반 연구 활성화를 위한 정책 연구’를 통해 뉘올레순 기지 운영 국가의 연구 성과 분석하고, 뉘올레순 기반 우리나라의 연구 성과 및 강점 분석한 뒤, 뉘올레순 기반 다학제 국제공동연구 전략적 참여 방안 수립

나. 국외 동향

(1) 빙하 소멸 관련 연구

- 2008년 시작된 CryoClim에서 스발바르 빙하의 시기별 넓이를 보여주는 Glacier Area Outline (GAO)과 빙하를 빙하 얼음, 중첩 얼음, 만년설 빙하로 구분하여 보여주는 Glacier Surface Type (GST) 제작
- ※ CryoClim는 노르웨이 우주 센터 (Norwegian Space Centre, NSC)에서 지원하는 유럽 우주국 (European Space Agency, ESA) PRODEX 프로젝트로 수행되었으며, 노르웨이극 지연구소(Norwegian Polar Institute, NPI), 노르웨이 컴퓨팅 센터(NR), 노르웨이 기상 연구소(Norwegian Meteorological Institute, MET Norway), 노르웨이 수자원 및 에너지 이사회 (Norwegian Water Resources and Energy Directorate, NVE)로 구성



그림 1. 스발바르 빙하의 시기별 넓이를 보여주는 Glacier Area Outline

(2) 빙하 소멸지역 미생물 연구

- 빙하 소멸지역 식물상의 천이과정에 관한 연구는 많이 이루어진 반면 토양 미생물의 천이과정에 관한 연구는 상대적으로 덜 이루어짐 (Brown and Jumpponen, 2014)
- 빙하후퇴시기에 따른 미생물 종 다양성, 생물량, 군집구조 변화와 관련한 연구가 주를 이룬 반면 미생물 종들의 외부 유입원과 유입경로에 관한 연구는 부족한 실정임 (Hamilton et al., 2013). 최근 스위스 알프스 Damma 빙하 소멸지역에서 토양 미생물의 유입경로에 대한 연구가 이루어졌고, 토양 세균의 경우 대기로부터 전파되는 외부유입원 보다 빙하기저면, 빙하 내부/표면과 같은 내부유입원에 의한 영향이 큼을 밝힌 바 있음 (Rime et al., 2016)

- 겨울철 snowpack 하부에 존재하는 미생물 활성에 관한 연구는 일부 이루어져 있지만 (Larose et al., 2013), 빙하 소멸지역 토양 미생물 천이과정의 계절적 변동에 관한 연구는 거의 진행된 바 없음
- 본 연구 사이트와 동일한 지역에서 과거 프랑스 연구팀에 의해 미생물 천이 연구가 이루어진 바 있으나, 빙하 소멸지역 전체가 대상이 아닌 대상법을 통한 샘플링으로 토양 세균군집을 대상으로 이루어졌고 이후 후속연구는 진행된 바 없음 (Schutte et al., 2009, 2010)

(3) 빙하 소멸지역 식생 연구

- 중앙로벤빙하 소멸지역에서 빙하 소멸 시기, 미세 지형, 교란 등 환경 요인을 고려하여 식물 분포도 작성 (Moreau et al., 2005)
- 노르웨이 극지연구소에서 현장 조사 또는 인공위성을 기반으로 한 스발바르 디지털지도 제작(<http://svalbardkartet.npolar.no/en/Viewer.html?Viewer=Svalbardkartet>)

(4) 빙하 소멸지역 이산화탄소 플럭스 연구

- 스위스의 중앙알프스에 위치하고 있는 Damma 빙하 소멸지역(150년)에서 토양 생성과 풍화 작용에 관한 연구. 2007년부터 초기 토양 생성과 생태계 발달을 결정하는 요인들에 대한 종합적인 이해를 위해 생물학, 광물학, 지화학, 수문학 등의 다학제적 접근을 통한 연구 진행 (Bernasconi, 2011)
- Damma 빙하 소멸지역에서 빙하 소멸 시기가 다른 세 지점으로부터 3년 동안 토양 호흡, 토양 CO₂의 기원, DOC 유출양 조사를 통해 초기 토양 형성 동안 탄소 순환에 대한 연구 (Guelland et al., 2013)
- 아이슬란드, 알래스카, 노르웨이, 그린란드에서 빙하 소멸지역에서 단기간 토양 호흡 측정 (Jones et al., 2000; Nakatsubo et al., 1998; Welker et al., 2000; Wookey et al., 2002)

(5) 스발바르 육상 지질 연구

- 노르웨이 극지연구소는 스발바르 지질도록 발간의 마지막 지역으로 Prince Karl Foreland에 대한 현장조사를 수행 중. 폴란드 연구팀과 공동 현장조사를 수행
- 노르웨이 극지연구소는 남쪽 Hornsund 지역을 대상으로 폴란드 팀과 협동조사 수행 예정, 유럽대륙의 형성에 관련된 조산운동 이해를 위한 연구의 일환으로 스발바르 변성암 연구를 수행
- 스발바르 지역 후기 고생대 퇴적층에 대한 기초조사는 노르웨이 극지연구소의 지질도 발간에 맞추어 이루어졌으며, 이후 노르웨이-일본 공동 조사팀에 의해 1980년대에 층서, 고생물 등에 대한 다양한 조사가 이루어짐

- 최근에는 노르웨이 극지연구소 소속 Dierk Blomeire가 2000년대 중후반에 현미퇴적상을 분석하였으며 (Blomeire et al., 2009) 독일 연구팀도 최근 현장조사를 수행한바 있음. 또한 UNIS를 기반으로 다수의 학생들이 석,박사 프로젝트를 수행하였음



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 빙하후퇴 시기 및 지형에 따른 토양 유기물과 식생, 미생물의 변화 파악

1. 중앙로렌스 박사가 2003년에 샘플링한 300 지점 중

가. 조사 지점 선정, 방법 및 결과

총화표본추출(stratified sampling)을 이용하여, Moreau 박사가 2003년에 샘플링한 300 지점 중 식물 조사를 위해 117개 지점을 선정하였고, 토양 샘플링을 위해 42개 지점을 선정하였다. 그리고 2004년-2014년 사이에 후퇴한 영역을 포함시키기 위해 3개 지점을 선정하였고, 레퍼런스 지표로 사용하기 위해 빙하에 영향을 받지 않고, 교란 없이 안정적으로 식생이 발달한 9개 지점을 추가로 선정하였다. 추가로 선정한 12개 지점에서는 식물조사와 토양 샘플링을 모두 실시하였다. 총화표본추출 방법에서 사용한 지표로는 X, Y좌표, runoff, 빙하후퇴 시기(age), 경사(slope) 바람(wind) 등의 정보를 이용하였다(표 1-1).

또한 총 129개 지점에서 Global Navigation Satellite System (GNSS)을 이용하여, 정확한 좌표를 선정한 후, 깃대로 위치를 표시하였다(그림 1-3, 그림 1-6). 식물의 조사는 1x1 m 방형구 내에 10 cm 간격으로 줄을 연결하여 100개의 격자를 만들고, 그 중 6개의 격자를 임의로 선택하여, 6개의 격자 내에 존재하는 식물을 표시하였다(그림 1-4). 1회 조사 후, 1 x 1 m 방형구를 오른쪽, 아래, 왼쪽으로 돌리며 동일한 방법으로 총 4회 식물 조사를 하였으며 전체 2x2 m 면적에서 24×100 cm² 면적을 조사하였다(그림 1-5).

식물 조사 결과 빙하후퇴지역에서 총 31 종의 관속식물과 지의류, 이끼류 등이 분포함을 알 수 있었으며 주요 식물군으로 자주범의귀(*Saxifraga oppositifolia*), 북극콩버들(*Salix polaris*), 북극 점나도나물(*Cerastium arcticum*), 눈개미자리(*Sagina nivalis*), *Draba oxycarpa*, *Minuartia rubella*, 씨범꼬리(*Bistorta vivipara*) 등이 있었다(표 1-2, 그림 1-1).

토양 샘플링은 총 54개 지점에서 각 지점당 3개의 반복수(R1, R2, R3)로 총 162개 구덩이(hole)에서 토양 시료 샘플링을 하였다(그림 1-6). 반복수 중에서 R1은 가밀도 측정을 위해, 토양을 샘플링한 후, 모래를 이용하여 구덩이의 부피를 측정하였고, R2와 R3에서는 부피 측정 없이 토양만 샘플링 하였다(그림 1-7). 기반암 때문에 샘플링이 불가능한 경우를 제외하고 대부분 4개의 깊이-D1(0-5 cm), D2(5-10 cm), D3(10-20 cm), D4(20-30 cm)-에서 시료를 채취 하였으며 총 600개 토양 시료를 확보하였다. 그 후 실험실로 돌아와 토양 생중량(fresh weight, FW)을 측정하였다.



(A) *Saxifraga oppositifolia*



(B) *Salix polaris*

그림1-1. 중앙로 벤빙하 후퇴지역에 서식하는 주요 식물 2종

(A) 자주범의귀, (B) 북극콩버들



그림 1-2. 중앙로 벤빙하 후퇴지역 전경

표 1-1. 기존 300 조사 지점 및 2014년도 식물 및 토양 조사 지점 정보

No.	ID	SOC	Veg	X_coor.	Y_coor.	Wind	Form	Age	DEM	Aspect	Slope	Length	Curv.	Runoff
1				78.90604	12.07136	255	0	1920	13.08	6.12	9.10	-	-38.13	no
2				78.90592	12.07372	255	1	1920	13.88	117.49	21.74	0.71	-123.39	act
3			O	78.90576	12.0605	face	0	1928	28.24	233.86	19.83	3.54	-22.55	no
4				78.90576	12.06994	255	0	1929	23.64	304.68	27.63	3.21	-20.86	no
5			O	78.90574	12.07926	face	0	1921	13.37	261.88	11.35	1.71	4.00	no
6	6	O	O	78.90566	12.07658	255	0	1926	23.08	65.44	27.87	-	66.14	no
7				78.90565	12.07892	255	0	1927	19.26	48.44	40.83	6.86	49.78	no
8			O	78.90549	12.07206	face	0	1937	22.62	123.08	6.67	-	15.17	no
9				78.90553	12.08202	255	0	1923	12.22	11.00	16.28	1.21	-31.89	no
10	10	O	O	78.90509	12.04373	255	0	1931	29.07	77.38	12.98	0.50	-101.49	no
11				78.90546	12.08344	face	0	1922	12.44	6.62	11.98	1.71	3.93	no
12		O		78.90538	12.0788	face	0	1936	19.93	85.27	22.73	1.00	-125.78	no
13		O		78.90529	12.07537	face	0	1937	22.39	256.06	20.96	2.50	-3.27	no
14				78.90524	12.07352	255	0	1938	15.02	103.55	12.20	-	38.39	no
15				78.90496	12.05094	face	3	1936	28.37	63.86	19.51	0.71	-57.54	inact
16		O		78.90506	12.06471	face	0	1936	23.65	210.86	4.88	-	18.65	no
17				78.90468	12.03098	255	0	1925	36.62	349.60	36.40	0.50	-74.39	no
18				78.90471	12.03908	face	0	1939	27.47	234.99	2.64	-	154.22	no
19				78.90498	12.07294	abris	0	1940	17.38	14.39	17.87	2.62	28.66	no
20	20	O	O	78.905	12.07918	face	0	1937	20.55	8.84	7.74	0.71	4.61	no
21		O		78.90479	12.06078	255	0	1931	25.48	325.52	17.32	3.54	2.16	no
22		O		78.90454	12.03819	abris	0	1939	28.09	137.47	9.05	2.83	-34.26	no
23				78.90489	12.07632	face	0	1939	18.89	261.40	7.87	0.50	5.34	no
24				78.90454	12.04611	face	1	1939	25.53	353.66	6.36	0.50	4.82	act
25	25A	O	O	78.90474	12.07076	face	0	1941	20.16	231.81	7.94	0.71	16.78	no
26				78.90462	12.06399	face	0	1937	22.25	337.42	9.52	0.50	-20.94	no
27		O		78.90438	12.04108	face	0	1942	28.01	82.47	13.87	3.12	-69.68	no
28				78.90474	12.08307	255	0	1936	26.48	217.08	32.39	0.71	-4.47	no
29		O		78.90442	12.05258	face	0	1941	27.90	162.06	13.47	-	75.88	no
30				78.90448	12.06775	face	0	1942	20.40	27.58	1.98	-	6.25	no
31				78.90415	12.03783	face	0	1941	30.72	14.63	5.55	0.71	10.20	no
32				78.90401	12.02687	abris	0	1922	32.65	294.81	12.46	19.02	-51.20	no
33				78.90455	12.08442	face	0	1932	23.39	141.52	2.78	1.71	0.87	no
34				78.90423	12.05468	face	3	1938	24.32	52.25	13.44	7.24	7.82	inact
35				78.90404	12.04112	face	0	1944	27.93	80.53	8.24	3.21	-16.13	no
36		O		78.90395	12.03695	face	0	1942	34.42	40.62	6.51	0.71	-63.21	no
37	37A	O	O	78.90391	12.03705	face	0	1942	34.06	330.62	11.96	2.83	-5.64	no
38		O		78.90427	12.07242	face	1	1945	19.62	291.29	6.71	1.50	-11.99	act
39				78.90382	12.03456	255	0	1941	36.40	320.33	22.20	0.71	-31.50	no
40				78.90392	12.0487	face	0	1946	28.87	316.59	20.83	1.41	10.41	no
41		O		78.90406	12.06647	abris	1	1944	20.41	24.64	8.19	-	-4.21	act
42				78.90384	12.04826	face	0	1946	27.21	230.04	7.95	1.21	-6.36	no
43		O		78.9041	12.07624	face	0	1944	19.46	69.37	1.93	-	101.44	no
44				78.90416	12.08657	face	2	1927	16.35	10.99	8.95	0.50	4.68	inter
45				78.90355	12.03081	abris	0	1938	36.20	359.32	4.28	7.45	-8.35	no
46		O		78.90358	12.03761	255	0	1945	38.84	62.06	9.67	-	5.38	no
47	47A	O	O	78.90395	12.07814	abris	0	1944	20.72	159.87	10.54	0.50	-35.84	no
48				78.90371	12.0564	face	1	1948	25.94	86.52	0.75	-	-6.63	act
49				78.90351	12.03949	face	0	1947	30.78	223.14	15.09	2.83	-39.89	no
50				78.90336	12.02853	face	2	1931	42.35	166.31	17.90	1.71	-36.21	inter
51		O		78.90399	12.09463	face	0	1920	15.56	115.63	13.46	0.71	5.76	no
52				78.90376	12.07437	abris	1	1948	18.44	320.64	4.01	-	1.44	act
53				78.90357	12.05923	255	0	1948	29.26	225.56	14.43	3.12	-31.31	no
54		O		78.90308	12.01957	255	0	0	44.47	337.13	27.82	2.83	10.58	no
55				78.90386	12.09401	255	0	1921	19.07	85.10	15.70	-	69.95	no
56				78.90336	12.04792	abris	3	1951	27.89	345.59	4.19	0.50	6.61	inact
57		O		78.9037	12.08501	255	0	1935	22.09	326.60	20.51	4.24	-3.22	no
58				78.90315	12.03185	abris	0	1941	38.07	73.24	6.23	2.91	-3.23	no
59				78.90345	12.06504	abris	2	1949	21.95	26.75	5.91	-	19.37	inter
60	60	O	O	78.90337	12.06189	face	0	1950	27.71	58.84	11.63	-	40.83	no
61				78.90343	12.07008	abris	3	1950	19.56	20.45	7.63	-	26.42	inact
62	62	O	O	78.90344	12.07343	abris	3	1949	19.68	45.73	3.92	0.71	10.34	inact
63			O	78.90306	12.03802	abris	0	1948	33.92	52.49	6.49	-	55.32	no
64				78.90338	12.07391	abris	3	1949	20.00	124.97	1.46	0.50	-5.84	inact
65				78.90347	12.08591	face	0	1935	21.00	41.93	1.41	-	7.13	no
66	66	O	O	78.90282	12.02644	255	0	1930	49.26	186.12	14.15	6.33	-34.67	no
67				78.90281	12.02644	255	0	1931	48.90	268.47	5.64	3.21	-13.19	no
68				78.90291	12.03853	abris	0	1950	32.36	340.86	10.16	2.21	-1.10	no

No.	ID	SOC	Veg	X_coor.	Y_coor.	Wind	Form	Age	DEM	Aspect	Slope	Length	Curv.	Runoff
69			O	78.90313	12.06317	abris	0	1952	25.29	355.55	28.63	1.00	-33.70	no
70			O	78.90288	12.04348	face	0	1954	30.19	79.76	27.33	1.00	-173.45	no
71	71	O	O	78.90329	12.08726	face	0	1934	20.90	276.27	2.87	9.24	-4.48	no
72				78.90293	12.05353	abris	2	1955	26.85	260.48	2.08	-	15.22	inter
73				78.90273	12.03709	face	0	1949	36.93	11.98	12.35	-	90.26	no
74				78.90295	12.06284	abris	1	1953	27.39	211.15	5.31	0.71	-8.84	act
75				78.90278	12.04984	abris	3	1957	28.01	326.58	2.31	-	11.03	inact
76				78.90308	12.08229	abris	0	1943	21.10	256.07	5.43	-	19.96	no
77				78.90312	12.0888	face	1	1933	17.61	306.24	1.23	-	13.03	act
78		O	O	78.90293	12.07412	abris	0	1952	20.77	223.62	3.62	-	4.63	no
79				78.90255	12.03835	abris	0	1953	31.81	14.19	6.84	0.71	-19.93	no
80				78.90276	12.06261	abris	0	1955	27.35	153.76	4.93	0.50	-24.90	no
81	81	O	O	78.90248	12.03687	abris	0	1952	34.09	30.00	9.49	-	99.65	no
82				78.90248	12.04134	face	0	1956	30.76	23.61	4.57	-	-12.20	no
83				78.90272	12.06691	abris	0	1955	23.90	58.26	3.91	-	28.19	no
84	84	O	O	78.90267	12.06599	abris	0	1955	24.46	82.40	8.51	1.71	-42.22	no
85				78.90281	12.08236	abris	3	1945	21.27	229.70	1.58	-	-16.18	inact
86		O	O	78.9027	12.07409	abris	0	1953	21.07	262.11	2.65	2.21	0.66	no
87				78.90254	12.06351	abris	0	1957	27.31	24.48	11.52	0.71	29.07	no
88		O	O	78.9028	12.09242	abris	0	1931	24.20	168.28	21.64	3.00	-40.25	no
89				78.90287	12.10145	face	0	1921	19.03	2.86	6.15	-	23.79	no
90				78.90225	12.0415	255	3	1958	31.48	196.16	2.65	-	13.72	inact
91		O	O	78.90252	12.07218	abris	0	1955	21.29	25.62	6.75	0.71	4.75	no
92				78.90222	12.0457	abris	1	1960	30.20	147.67	3.82	-	8.47	act
93	93	O	O	78.9022	12.0457	abris	1	1960	30.25	354.98	5.60	0.50	-0.63	act
94				78.9021	12.03837	face	0	1957	33.81	164.57	6.93	-	104.43	no
95		O	O	78.90263	12.09489	face	0	1930	26.60	69.23	1.06	0.50	-2.62	no
96				78.90248	12.08375	abris	0	1946	22.16	262.45	7.27	4.50	-33.34	no
97				78.90216	12.05354	abris	2	1962	27.46	189.53	4.74	-	23.37	inter
98				78.90214	12.05541	abris	0	1961	26.47	34.33	3.71	-	69.63	no
99				78.90194	12.03869	abris	0	1958	33.71	10.02	3.81	2.12	-39.41	no
100				78.9023	12.07979	abris	0	1951	22.84	249.40	2.64	-	-3.72	no
101				78.9024	12.09411	face	0	1932	26.47	168.97	7.89	0.50	-11.29	no
102	102	O	O	78.90174	12.02943	face	0	1950	45.03	157.11	2.62	1.00	-50.29	no
103	103	O	O	78.90213	12.07116	face	0	1957	24.01	62.51	16.71	16.90	-25.41	no
104		O	O	78.90237	12.0998	255	0	1925	36.13	348.57	4.98	1.71	-79.60	no
105				78.90162	12.0261	abris	0	1943	49.83	153.16	13.88	18.81	-67.78	no
106				78.90207	12.07463	abris	0	1956	22.29	262.04	5.82	-	16.58	no
107		O	O	78.90184	12.05456	abris	0	1964	27.61	13.42	7.29	-	15.47	no
108				78.90168	12.04128	abris	3	1963	32.53	110.11	2.68	-	-0.72	inact
109				78.90175	12.05244	abris	0	1966	29.65	1.64	8.78	0.50	25.16	no
110				78.90179	12.05858	abris	0	1963	27.43	101.47	3.36	-	19.15	no
111		O	O	78.90196	12.07829	abris	2	1954	23.55	316.87	7.35	2.91	-48.33	inter
112				78.90193	12.07867	abris	1	1954	23.59	332.57	2.72	2.21	-38.62	act
113				78.90155	12.04289	abris	0	1965	32.32	28.34	0.22	-	15.04	no
114		O	O	78.90179	12.07119	abris	0	1959	29.02	19.58	6.78	1.00	5.47	no
115				78.90208	12.10295	face	0	1922	31.64	74.65	15.23	23.47	-37.87	no
116		O	O	78.90173	12.0709	face	0	1960	34.75	5.56	23.63	3.00	-1.35	no
117				78.90203	12.10353	face	0	1921	30.62	23.98	23.84	-	6.69	no
118				78.90158	12.06096	abris	0	1965	29.52	12.71	2.93	2.41	6.69	no
119				78.90172	12.07928	abris	3	1955	24.12	321.06	5.46	2.12	-7.70	inact
120	120	O	O	78.90162	12.07279	abris	0	1960	26.83	104.46	6.06	62.15	-11.43	no
121				78.90162	12.07596	abris	3	1958	24.33	34.30	6.11	-	12.23	inact
122				78.90162	12.07791	abris	3	1956	24.69	38.44	5.61	-	6.38	inact
123		O	O	78.90164	12.08359	abris	1	1951	23.20	1.70	0.92	-	33.75	act
124	124	O	O	78.90125	12.04763	abris	0	1966	35.92	48.78	10.31	1.41	8.78	no
125				78.90159	12.08454	abris	1	1951	22.86	57.60	5.92	1.21	-9.06	act
126				78.90146	12.07451	abris	0	1960	27.58	75.10	11.05	3.41	-64.49	no
127		O	O	78.90156	12.08892	abris	1	1948	23.68	48.42	12.34	1.41	38.97	act
128				78.90101	12.03521	face	0	1962	37.93	216.05	5.41	-	-27.02	no
129				78.90165	12.10334	255	0	1923	31.74	214.58	16.45	3.54	-34.84	no
130	26	O	O	78.90148	12.0896	abris	3	1948	23.32	63.76	5.70	-	1.78	inact
131				78.90149	12.09202	abris	3	1942	27.57	347.35	10.53	1.21	-4.31	inact
132	132	O	O	78.90128	12.0739	abris	0	1961	32.23	39.10	18.13	-	-6.69	no
133				78.90105	12.10077	face	0	1927	30.48	233.66	11.85	12.78	-118.84	no
134				78.90133	12.0874	abris	2	1949	22.54	47.03	5.45	2.62	-32.65	inter
135		O	O	78.9012	12.077	abris	0	1959	26.11	8.19	2.88	-	37.41	no
136				78.90097	12.05749	abris	0	1969	34.14	11.35	12.38	4.83	-40.97	no
137				78.90113	12.07748	abris	0	1959	26.20	327.98	1.30	-	23.25	no
138	138	O	O	78.90092	12.05927	abris	1	1969	34.05	330.30	4.58	5.91	-23.15	act
139				78.90113	12.08261	abris	1	1955	24.55	1.32	4.15	1.50	-9.18	act

No.	ID	SOC	Veg	X_coor.	Y_coor.	Wind	Form	Age	DEM	Aspect	Slope	Length	Curv.	Runoff
140		O		78.90088	12.06087	abris	2	1969	32.92	300.30	3.32	-	11.90	inter
141	141	O	O	78.90107	12.08206	abris	1	1956	24.89	26.87	4.00	-	-12.42	act
142				78.90112	12.08978	face	3	1948	23.43	216.41	7.77	-	109.87	inact
143				78.90124	12.10746	255	0	1922	31.60	122.09	17.50	2.83	-84.32	no
144		O		78.90059	12.04371	255	0	1970	40.10	171.06	28.49	2.21	-26.92	no
145				78.90091	12.07866	face	0	1960	31.59	271.19	0.74	2.21	-31.65	no
146		O		78.9007	12.06026	abris	0	1969	34.87	48.81	5.49	23.14	-46.00	no
147				78.90101	12.09447	abris	0	1939	26.66	25.74	3.94	3.12	-21.75	no
148				78.90061	12.0573	abris	0	1971	36.60	256.56	6.45	7.45	-17.82	no
149	25	O	O	78.90087	12.08752	face	3	1951	23.90	10.67	4.97	4.41	-117.99	inact
150		O		78.90102	12.10481	face	0	1925	33.51	313.00	10.23	0.71	34.25	no
151				78.90078	12.08372	abris	1	1956	25.71	58.59	3.78	0.71	1.22	act
152				78.90068	12.07704	abris	2	1962	29.04	93.41	6.65	0.50	15.12	inter
153				78.90063	12.07584	abris	2	1963	30.28	39.61	7.37	0.71	-7.82	inter
154				78.90034	12.04992	abris	0	1974	37.69	92.98	27.98	4.71	-128.49	no
155		O		78.90088	12.10783	255	0	1923	29.54	14.28	13.12	1.00	-1.19	no
156				78.90064	12.08609	abris	3	1954	25.06	333.19	3.71	-	-1.66	inact
157	157	O	O	78.9004	12.065	abris	3	1970	38.67	318.05	5.26	5.04	-1.63	inact
158				78.90012	12.03973	abris	3	1975	37.13	47.80	5.91	-	115.71	inact
159		O		78.89996	12.05198	abris	0	1975	38.51	26.09	9.55	0.71	3.74	no
160		O		78.90032	12.06605	face	2	1970	38.68	110.30	0.83	-	9.87	inter
161				78.9002	12.05769	abris	0	1974	43.03	63.76	2.06	-	20.52	no
162				78.90046	12.08772	abris	0	1953	26.18	26.91	13.43	3.41	7.22	no
163				78.90054	12.09776	abris	0	1935	33.58	291.67	0.53	-	31.35	no
164		O		78.90051	12.0987	abris	0	1934	32.78	224.30	1.39	15.69	-40.58	no
165				78.8999	12.03895	abris	3	1974	37.71	53.81	2.45	-	59.44	inact
166				78.90006	12.05913	abris	0	1974	41.78	16.96	8.32	38.26	-36.07	no
167				78.89989	12.04613	abris	2	1978	42.14	14.76	5.70	9.57	-70.16	inter
168				78.9001	12.06955	face	0	1969	37.97	158.15	2.30	2.21	-101.95	no
169		O		78.90033	12.09493	abris	3	1944	27.13	233.66	7.24	0.71	-45.45	inact
170	170	O	O	78.89981	12.04447	abris	0	1979	43.05	276.37	1.14	-	32.04	no
171				78.90034	12.10135	face	0	1932	31.58	136.18	1.10	-	-14.10	no
172		O		78.89961	12.03204	255	0	1950	49.04	272.94	14.64	8.33	-49.59	no
173				78.90026	12.10091	abris	0	1932	31.98	46.89	2.25	-	6.43	no
174				78.89994	12.07127	abris	0	1968	35.79	214.25	6.39	1.21	-147.25	no
175				78.89994	12.07472	abris	0	1967	34.67	311.95	14.01	-	23.38	no
176		O		78.90005	12.08838	abris	0	1954	32.45	97.59	6.56	-	23.73	no
177	30	O	O	78.90015	12.10066	abris	0	1933	31.98	158.78	3.76	0.50	-4.17	no
178				78.90014	12.10541	face	0	1928	35.44	256.34	7.68	2.21	-7.20	no
179				78.89944	12.03683	face	3	1969	40.54	278.04	3.33	-	47.62	inact
180		O		78.89948	12.0548	abris	0	1981	41.30	273.78	2.05	-	13.36	no
181				78.89963	12.07219	abris	0	1971	38.35	28.80	5.27	-	31.56	no
182	182	O	O	78.89971	12.07152	abris	0	1970	36.20	227.17	1.67	-	1.15	no
183				78.89996	12.10089	abris	0	1934	31.96	261.13	7.79	-	86.59	no
184				78.89928	12.03623	face	0	1967	41.74	129.55	6.60	-	-11.28	no
185				78.89977	12.08846	abris	0	1956	33.67	235.56	0.96	1.00	-44.91	no
186				78.89988	12.10203	abris	0	1933	31.12	218.83	2.17	2.41	-31.23	no
187				78.89921	12.03708	abris	2	1969	40.77	146.04	7.69	-	10.54	inter
188				78.89971	12.0921	abris	2	1951	31.92	46.43	5.42	-	36.29	inter
189		O		78.89913	12.03617	face	0	1965	42.19	127.62	5.73	3.12	-17.59	no
190		O		78.89975	12.10411	face	0	1931	31.52	197.44	12.14	-	11.16	no
191	191	O	O	78.89934	12.06463	abris	0	1978	42.63	342.51	3.54	0.50	-13.62	no
192				78.89961	12.09446	abris	0	1949	32.02	151.05	9.84	2.91	-16.49	no
193		O		78.89925	12.06269	abris	0	1981	43.46	133.17	2.78	-	-12.64	no
194				78.89989	12.03845	abris	3	1977	41.53	46.36	8.31	3.62	-74.37	inact
195				78.89902	12.04477	abris	0	1990	40.13	32.98	1.61	0.71	-0.41	no
196				78.8992	12.06708	abris	2	1977	39.89	95.16	13.01	8.16	-156.00	inter
197				78.89926	12.07536	abris	1	1971	32.50	42.58	3.63	-	4.01	act
198				78.89928	12.08122	abris	1	1966	32.94	105.58	15.47	7.74	5.62	act
199		O		78.89935	12.09238	abris	0	1952	32.98	55.00	5.64	1.91	-21.53	no
200				78.89918	12.07752	255	2	1970	32.68	347.25	7.17	1.50	-13.16	inter
201				78.89945	12.10801	255	0	1926	27.37	91.72	5.28	1.21	-0.43	no
202				78.89921	12.08851	abris	0	1958	35.27	41.81	1.77	-	-10.51	no
203				78.89912	12.08303	abris	3	1965	35.06	53.77	8.08	1.21	-14.60	inact
204	34	O	O	78.89935	12.10832	face	3	1926	26.64	148.19	6.25	3.33	1.79	inact
205				78.89892	12.06976	face	0	1977	39.30	265.26	13.72	5.41	5.65	no
206		O		78.89917	12.09765	face	3	1942	31.84	22.30	6.31	-	8.08	inact
207				78.89883	12.06569	abris	0	1983	43.02	46.27	6.25	-	5.76	no
208				78.89894	12.08103	abris	1	1967	32.95	21.81	2.99	-	12.15	act
209		O		78.89883	12.07705	abris	2	1973	35.72	178.99	7.62	1.00	0.78	inter
210				78.89914	12.11154	face	3	1922	27.60	18.92	8.58	6.74	-6.09	inact

No.	ID	SOC	Veg	X_coor.	Y_coor.	Wind	Form	Age	DEM	Aspect	Slope	Length	Curv.	Runoff
211		O	78.89888	12.08953	abris	0	1958	36.05	304.54	6.96	-	57.66	no	
212			78.89895	12.09836	face	3	1941	32.79	47.54	2.91	7.83	-66.08	inact	
213			78.89894	12.1019	abris	0	1934	42.02	47.96	16.70	7.86	-55.95	no	
214		O	78.89889	12.10191	abris	0	1934	42.98	91.40	20.93	-	184.81	no	
215			78.89897	12.08771	abris	0	1961	35.71	22.10	12.25	23.76	-24.46	no	
216			78.89895	12.07211	abris	0	1977	39.07	30.31	5.96	0.50	-12.83	no	
217			78.89887	12.11291	abris	2	1921	28.50	270.78	17.85	1.21	7.95	inter	
218			78.89894	12.07195	abris	3	1978	40.35	346.10	4.55	3.50	-36.34	inact	
219		O	78.89836	12.07094	abris	0	1980	41.89	79.46	3.79	-	7.02	no	
220			78.89839	12.08118	255	1	1971	39.07	250.03	12.30	-	36.24	act	
221			78.8986	12.1072	abris	0	1927	36.77	19.85	24.85	-	41.07	no	
222	37	O	O	78.89841	12.09095	255	0	1957	37.79	55.63	6.94	13.57	-9.29	no
223			78.89848	12.10248	abris	0	1933	42.66	95.06	24.42	3.91	-52.47	no	
224		O	78.89807	12.06878	abris	0	1986	44.87	170.18	1.94	-	-8.08	no	
225	38	O	O	78.89813	12.07724	abris	0	1977	40.05	98.05	8.07	0.50	7.06	no
226			78.898	12.06954	abris	0	1985	45.19	55.42	2.78	2.21	-16.16	no	
227			78.89813	12.08674	abris	0	1965	42.76	320.53	6.28	-	79.40	no	
228		O	78.89825	12.10795	abris	0	1926	37.46	122.87	9.57	14.11	3.01	no	
229			78.89818	12.1048	abris	0	1930	36.70	351.96	19.92	3.62	0.73	no	
230			78.89805	12.09458	abris	0	1953	37.94	295.01	4.07	13.49	2.21	no	
231	39	O	O	78.89794	12.08865	abris	0	1963	42.83	128.59	29.81	0.71	-30.77	no
232			78.898	12.10307	abris	0	1932	36.45	298.88	8.38	1.21	-7.90	no	
233		O	78.8978	12.08738	abris	0	1966	44.53	57.40	2.62	-	-11.22	no	
234			78.89765	12.07559	abris	0	1982	44.82	44.10	10.43	2.83	10.89	no	
235			78.89758	12.07794	abris	0	1979	44.73	86.00	7.67	5.33	-4.15	no	
236			78.89745	12.06828	abris	2	1993	44.47	358.18	2.74	-	9.82	inter	
237	40	O	O	78.89747	12.07694	abris	2	1981	45.43	85.70	6.76	3.91	-25.93	inter
238			78.89766	12.09851	abris	2	1945	43.08	45.33	1.52	-	-10.38	inter	
239		O	78.89745	12.08598	face	3	1969	41.97	356.77	5.74	1.00	1.65	inact	
240			78.89765	12.11127	face	0	1921	38.49	124.46	21.70	1.41	-6.88	no	
241			78.89759	12.11091	255	0	1921	38.48	191.50	22.49	3.71	-56.34	no	
242			78.8972	12.07562	abris	0	1985	48.13	26.57	2.39	-	-0.36	no	
243		O	78.8974	12.10332	abris	0	1931	44.69	353.76	19.81	3.41	-19.57	no	
244			78.89731	12.10158	abris	0	1935	47.16	116.17	4.69	0.71	1.67	no	
245	41	O	O	78.897	12.07297	face	1	1990	43.11	229.80	17.40	2.83	90.35	act
246			78.89701	12.082	abris	0	1975	47.03	57.04	6.05	1.91	10.56	no	
247		O	78.89706	12.09633	abris	2	1954	45.37	342.81	5.31	0.71	-6.38	inter	
248			78.89691	12.08408	abris	1	1973	43.31	345.80	5.75	-	16.69	act	
249			78.89693	12.09608	abris	1	1955	46.48	61.72	13.82	0.71	-10.61	act	
250			78.89683	12.09294	abris	0	1962	46.42	4.94	11.68	-	31.00	no	
251		O	78.89677	12.09203	abris	0	1964	47.13	300.60	14.69	7.95	-160.99	no	
252	42	O	O	78.8967	12.08879	abris	3	1969	46.22	246.10	15.47	4.62	-164.68	inact
253	43	O	O	78.89662	12.09197	abris	0	1965	48.96	327.82	5.84	0.50	-17.23	no
254			78.89674	12.10554	255	0	1927	52.33	72.48	9.30	2.00	0.94	no	
255			78.8966	12.10045	abris	3	1936	51.90	102.27	7.29	-	10.05	inact	
256			78.89634	12.08627	255	1	1972	47.99	54.80	8.70	-	-6.08	act	
257			78.8964	12.0952	abris	0	1957	48.76	345.98	8.13	-	50.86	no	
258		O	78.89631	12.09494	abris	0	1958	49.09	267.36	5.32	0.50	14.13	no	
259			78.89617	12.08743	abris	3	1971	47.71	63.15	5.70	-	-4.51	inact	
260			78.89608	12.0882	abris	3	1970	48.46	39.51	12.26	1.41	8.78	inact	
261		O	78.89619	12.10866	255	0	1921	57.04	131.16	21.65	1.41	-62.97	no	
262			78.896	12.09614	abris	0	1955	53.76	343.23	3.71	1.00	-4.21	no	
263	44	O	O	78.89602	12.10545	255	0	1929	57.29	324.07	25.25	2.83	-14.50	no
264			78.89585	12.10065	abris	3	1944	54.27	318.55	14.97	4.24	19.60	inact	
265			78.89559	12.08563	abris	0	1974	55.95	65.35	8.78	1.91	14.43	no	
266	45	O	O	78.89557	12.09103	255	3	1966	53.50	292.71	13.93	1.21	-29.28	inact
267			78.89541	12.0853	255	0	1975	58.60	8.49	6.74	6.04	-7.29	no	
268			78.89549	12.0972	abris	0	1951	57.60	321.26	6.69	2.41	-82.94	no	
269			78.89527	12.08934	255	3	1969	53.42	33.81	4.73	-	12.14	inact	
270			78.89509	12.08389	255	0	1981	64.78	310.26	12.63	0.71	-29.02	no	
271		O	78.89506	12.0894	255	3	1969	53.65	169.86	1.75	-	-12.20	inact	
272			78.89492	12.08133	abris	1	1990	52.95	15.64	4.98	1.41	-143.20	act	
273			78.89486	12.09364	face	0	1957	64.13	243.46	4.14	1.41	22.31	no	
274	46	O	O	78.89473	12.08557	face	0	1977	71.52	309.51	8.51	4.83	-65.22	no
275			78.89471	12.09843	255	0	1941	66.79	334.33	45.50	11.69	134.44	no	
276		O	78.89457	12.09297	face	3	1958	62.63	115.82	6.31	1.00	-13.49	inact	
277			78.8944	12.09041	face	3	1967	59.97	333.65	7.68	-	33.60	inact	
278			78.89427	12.08755	abris	0	1973	66.39	86.00	15.04	2.00	-11.81	no	
279	47	O	O	78.89422	12.09399	abris	3	1949	64.63	295.17	7.17	-	2.01	inact
280			78.89408	12.09971	abris	3	1933	72.32	119.74	2.98	15.36	-57.10	inact	
281			78.89386	12.08989	abris	3	1970	61.70	53.36	7.05	7.54	-28.32	inact	

No.	ID	SOC	Veg	X_coor.	Y_coor.	Wind	Form	Age	DEM	Aspect	Slope	Length	Curv.	Runoff
282			O	78.89391	12.09919	abris	0	1934	75.15	64.51	7.68	2.62	-1.60	no
283				78.89372	12.09803	abris	0	1938	78.54	245.75	0.98	-	54.88	no
284			O	78.89357	12.09164	abris	3	1969	70.21	29.45	10.39	32.78	-43.87	inact
285				78.89341	12.09169	255	3	1970	76.11	356.84	17.11	3.50	-11.71	inact
286			O	78.89332	12.09217	255	3	1969	79.21	6.14	10.63	2.71	-6.63	inact
287	48	O	O	78.89309	12.0832	face	0	1989	67.53	300.63	7.79	1.41	8.54	no
288				78.89313	12.10042	face	0	1930	72.98	38.64	17.89	3.54	-32.32	no
289				78.89296	12.0919	abris	0	1969	80.03	4.36	30.79	2.50	-7.96	no
290				78.89277	12.08273	abris	0	1993	64.46	271.04	12.15	0.50	17.10	no
291			O	78.89279	12.10004	face	0	1931	81.77	8.56	5.41	0.50	-11.58	no
292	49	O	O	78.89253	12.08987	abris	0	1972	86.38	9.12	15.72	5.71	36.10	no
293				78.89243	12.09604	255	0	1947	97.88	126.38	6.52	1.41	3.78	no
294				78.89238	12.0967	255	0	1944	98.10	29.50	14.76	0.71	40.86	no
295				78.89216	12.0962	255	0	1945	102.30	290.05	8.17	-	37.24	no
296				78.8919	12.09357	abris	0	1954	98.40	332.90	20.00	77.06	11.94	no
297				78.89175	12.09109	255	0	1962	101.21	258.69	7.15	3.62	-58.70	no
298	50	O	O	78.89149	12.09516	255	0	1943	115.61	340.05	13.06	0.50	17.06	no
299				78.89115	12.09507	255	0	1940	119.28	165.02	12.79	-	58.18	no
300				78.89041	12.09367	255	0	1934	133.27	332.79	23.04	5.45	-0.13	no
301	301	O	O	78.8967	12.06317		0	2006	48.94	101.46	6.90	0.50	9.27	no
302	302	O	O	78.8975	12.0523		0	2003	46.55	239.47	2.56	-	-1.94	no
303	303	O	O	78.89638	12.04761		0	2011	64.93	352.38	15.38	53.92	19.83	no
304	304	O	O	78.90019	12.14132		0	1800						no
305	305	O	O	78.90306	12.14771		0	1800						no
306	306	O	O	78.90378	12.13		0	1800						no
307	307	O	O	78.9043	12.13097		0	1800						no
308	308	O	O	78.90362	12.12404		0	1800						no
309	309	O	O	78.90295	12.12135		0	1800						no
310	310	O	O	78.90414	12.1111		0	1800						no
311	311	O	O	78.90555	12.10581		0	1800						no
312	312	O	O	78.90602	12.10433		0	1800						no





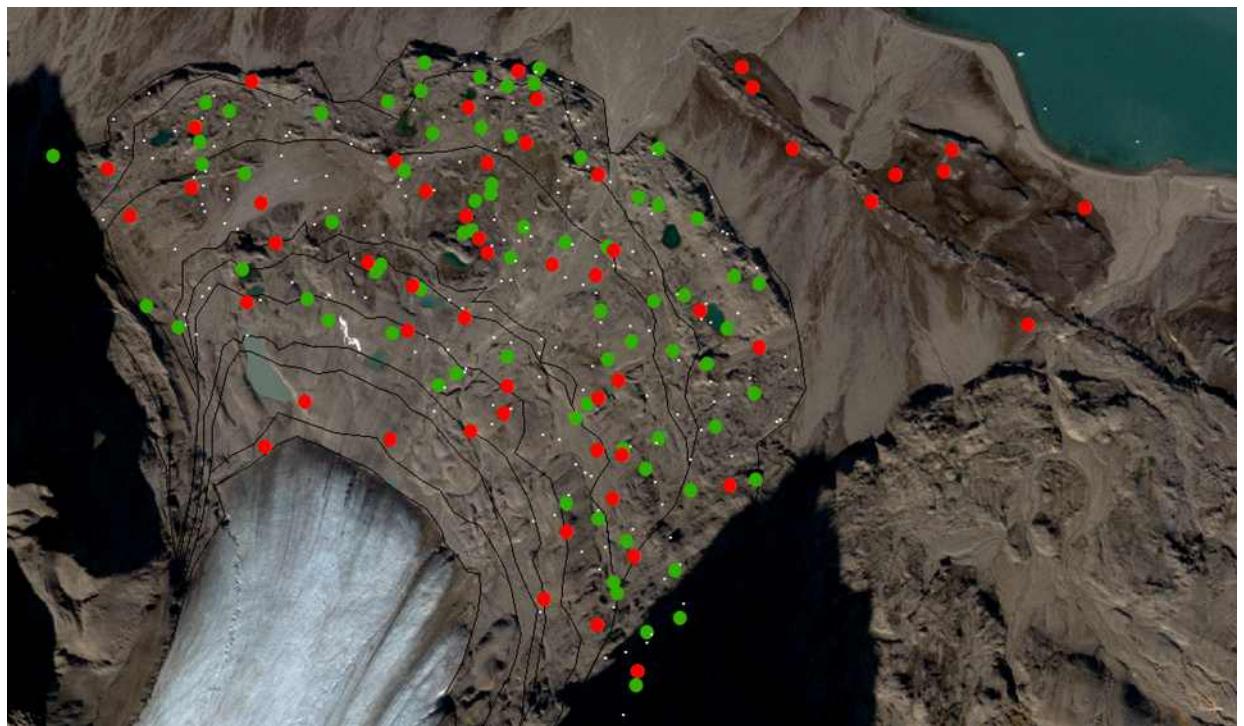
그림 1-3. GNSS를 이용하여 정확한 샘플링 좌표를 찾는 모습



그림 1-4. 식물조사에서 사용한 방형구



그림 1-5. 방형구를 설치하고 식생 조사 중인 모습



● 토양과 식물 조사 지점; ● 식물 조사만 한 지점; ○ 2003년 모로우 박사 조사 지점

그림 1-6. 중앙로 벤빙하 후퇴 지역에서 식물 조사 및 토양 샘플링 지점



그림 1-7. 토양 가밀도 계산을 위해 토양 부피를 측정하는 모습

지점: 303 (빙하후퇴 시기 2011), 빙하에 가장 가까운 척박한 지역	지점: 302 (빙하후퇴 시기 2003), 약간의 이끼와 soil crust가 형성된 지역
지점: 132 (빙하후퇴 시기 1961), soil crust와 간헐적으로 자주범의귀 관찰	지점: 62 (빙하후퇴 시기 1949), soil crust와 자주범의귀 우점
지점: 20 (빙하후퇴 시기 1937), 자주범의귀 우점, 약간 건조한 지역	지점: 312 (빙하 영향 받지 않은 오래된 지역) 자주범의귀, 이끼장구체 우점. 유기물이 많음

그림 1-8. 빙하 후퇴 시기에 따른 일부 지점의 표층 모습

2. 식생분포 지도 제작

가. 식생자료와 환경자료 이용 빙하후퇴지역 내 식생지도 작성

정량적 식생 데이터를 정성적 데이터 형태로 변환하였으며, 식생 데이터와 샘플링 지점 자료를 이용하여 대응 인자 분석을 실시하였다. 분석을 통하여 식물의 종류에 따라 식생 퍼도나 토양 연대, 노출 정도, 수분 경사 등이 연관되어 있는 것을 확인하였다. 대응 인자 분석의 1, 2, 3축 값을 이용하여 ascending hierarchical classification을 통해 샘플링 지점과 정성적 데이터로 변환한 식생 데이터를 8개 계층으로 분류하고, 각 계층의 식생 특성을 분석하였다. 식생 자료와 계층, 지점의 자료를 학습집합(training set)으로 설정하고, 최대우도 추정법(maximum likelihood estimator)을 통해 식생 데이터가 없는 픽셀의 환경인자(고도, 사면 경사, 위성자료, 토양 연대 및 2013년 빙하 끝에서부터 거리)와 계층을 고려하여 식생지도를 완성하였다(그림 1-9).

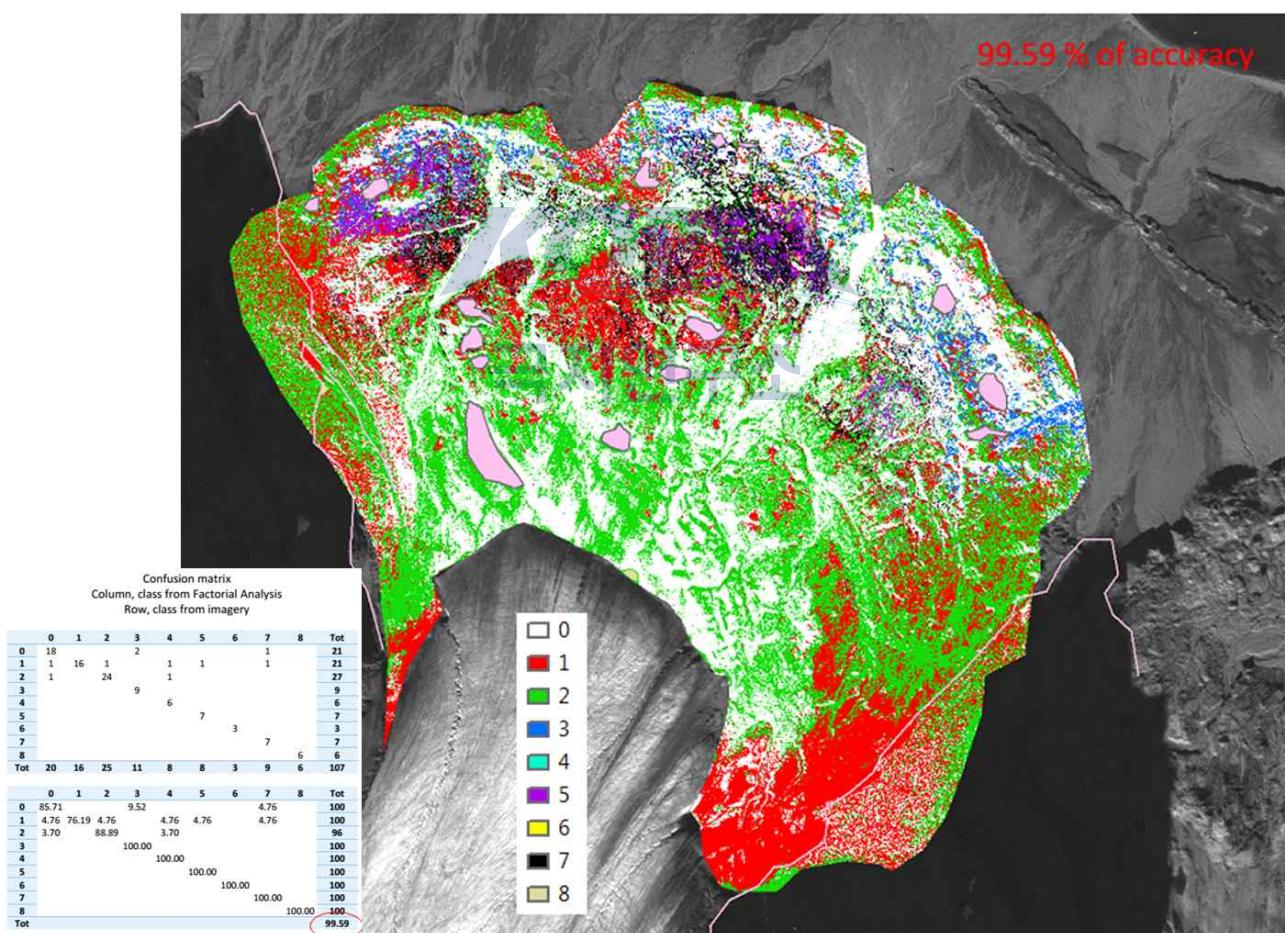


그림 1-9. 중앙로벤빙하 후퇴지역의 식생지도

나. 다변량 분석 (대응 인자 분석, Correspondences Factors Analysis, CFA)

정성적 데이터로 변환된 데이터를 이용하여 관속식물, 지의류, 이끼류, 생물학적 토양 피각(black crust)의 피도 데이터와 총 식물종 수, 자주범의귀, 북극콩버들의 피도 데이터를 각각 5-6개의 클래스로 구분하였으며, 일부 지역에서 제한적으로 드물게 나타나는 대부분의 식물들은 2개의 클래스(존재 유무)로 구분하여 0과 1로 구성된 disjunctive matrix로 변환하였다. 그리고 식생 데이터와 샘플링 지점 자료를 이용하여 대응 인자 분석을 실시하였는데 결과는 다음과 같다(그림 1-10, 1-11).

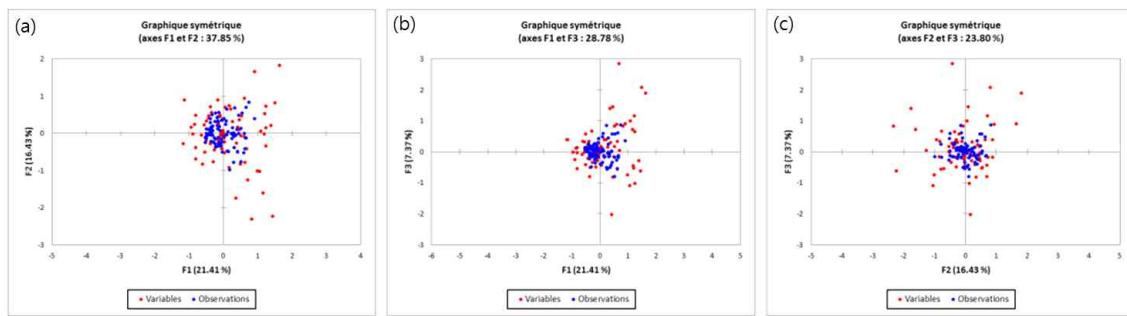


그림 1-10. 대응 인자 분석 결과 (a) 1-2축, (b) 1-3축, (c) 2-3축

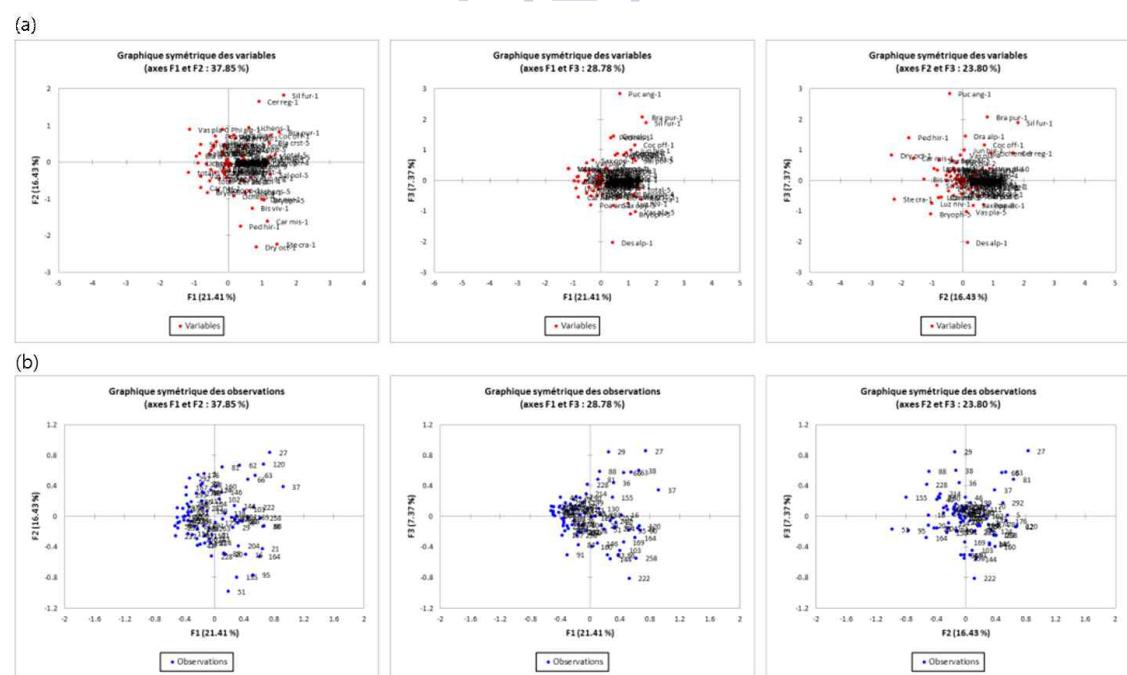


그림 1-11. 대응 인자 분석 결과 factorial space에서의 (a) 식생자료 분포, (b) 샘플링 지점 분포

식물 데이터가 각 축에 대해 선형구조를 가지는지에 대해 개개 식물 종별 분석을 실시하였다(그림 1-12). 1축은 식생 피도 증감과 관련된 것으로 분석되며 관속식물, 지의류, 이끼류, 생물학적 토양 피각, 총 식물 종 수, 자주범의귀, 북극콩버들의 피도가 1축을 따라 증가하는 패턴을 보였으며, 이는 토양 연대와도 연관이 되어 있음을 확인할 수 있었다(그림 1-12). 2축은 노출 정도와 관련되어 있는 것으로 분석되었으며, 이 중에서 언덕과 같이 노출된 지형에서 많이 발견되는 북극담자리꽃나무(*Dryas octopetala*)와 사초과 *Carex nardina*는 2축을 따라 감소하는 패턴을 보이고, 눈이 늦게 녹는 snowbed에서 자라는 눈개미자리(*Sagina nivalis*)는 2축을 따라 증가하는 패턴을 보였다(그림 1-12). 3축은 수분경사와 관련되어 있는 것으로 분석되며 이끼류가 3축을 따라 선형적으로 감소함을 확인하였다(그림 1-13).

다. 식생과 샘플링 지점의 계층적 분류 (Hierarchical classification)

대부분의 식생데이터(98%이상)는 한 두 지점에서 나타나고 다른 샘플링 지점에서는 조사되지 않는 패턴이므로, 인자공간(factorial space)에 나타난 식생과 샘플링 지점의 식생분포가 고르지 않았다. 샘플링 지점은 공간상 가운데에 구름처럼 모여 있고, 식생은 여러 지점으로 퍼져있다. 이 때 분류를 하게 되면, 식생과 샘플링 지점이 고르게 섞여있는 class를 얻기 어려우므로, 2가지 단계로 분류(classification)를 시도하였다.

먼저 샘플링 지점 데이터만으로 8개의 계층적 분류(그림 1-14)를 하고, 각 class의 무게 중심을 계산하였다. 그리고 각각의 식생 데이터와 각 class의 무게 중심 사이 Euclidean distance를 계산하여, 그 식생과 가장 최소거리로 나타나는 class로 할당하였다(그림 1-15, 1-16). 식생이 존재하지 않아 대응 인자 분석에 포함시키지 않았던 지점들을 class 0으로 할당하였다. 그리고 각각 class에 속하는 식생자료 특성 profile 분석 한 뒤(그림 1-17), 다음과 같은 각 class별 특성을 구분하였다.

각 class의 특성

Class 0 : 식생이 거의 존재하지 않는다. 토양이 노출된 지 얼마 되지 않아 식물이 정착할 기회가 적었거나, 눈 또는 빙하가 녹은 물이 흘러 식생을 제거하였을 수도 있고, 매우 노출된 지역처럼 식생이 정착하기에 환경 조건이 아주 열악해서일 수 있다.

Class 1 : 노출이 많이 되지 않았으나, 낮은 식생 피도를 가진다. 2-5 종류의 식물이 10% 이하의 식생피도를 보이며, 생물학적 토양 피각 5% 이하, 지의류는 1% 이하를 보인다. 이 지역을 구성하는 식물로는 주로 자주범의귀 또는 북극콩버들이 있다.

Class 2 : 중간 정도의 건조 또는 건조한 지역이며, 빙하퇴적물(moraine)이 오래 노출된 지역이다. 식생 피도가 낮으며 전체 식생 피도는 12% 이하이다. 생물학적 토양 피각 10% 이하이고 지의류는 5% 이하이다. 대표적인 관속식물은 자주범의귀가 있다.

Class 3 : 언덕처럼 노출이 많고, 식생 피도가 높다. 3-7종의 식물이 분포하며 생물학적 토양 피

각과 지의류의 피도는 10% 이하이다. 다발벼의 귀와 얼룩사초와 같은 빙하퇴적물에서 잘 발견되지 않는 종들이 분포하며, 자주벼의 귀보다 북극콩버들의 피도가 더 높다(10-20%). 식생이 간헐적으로 분포하는 class 1-3 중에서 class 3은 노출이 많이 된 지역으로 보다 많은 종들이 분포하고 식생 피도도 상대적으로 높다.

Class 4 : 식생 피도가 낮다. 생물학적 토양 피각과 지의류의 피도가 5% 이하이며, 종의 숫자도 3-6 종을 가진다. 이끼류와 관속식물의 피도는 2% 이하이다. 긴털송이풀과 *Draba*(꽃다지류) 종의 분포는 이 지역이 빙하후퇴지역에서 오래된 곳임을 나타내고, *Juncus biglumis*(골풀류) 분포는 습윤한 상태의 지역이 있음을 나타낸다.

Class 5 : 식물 종은 3-6종이 분포한다. 이 class는 생물학적 토양 피각이 3-50%의 넓은 범위를 보이고, 지의류와 이끼류의 피도가 낮은 것이 특징이다. 관속식물의 피도는 2-16%에 달한다. *Silene furcate*와 *Juncus biglumis*, 자주꽃다지아재비 종들이 분포하는 것으로 보아 미세한 입자의 토양(미사, 점토)이며, 습윤하고, 눈으로 덮인 서식처의 특성을 가지는 것으로 사료된다.

Class 6 : 식물은 2-4종이 분포하며 존재하는 식물 종수가 낮은 class. 생물학적 토양 피각과 지의류가 우점하고, 이끼류와 관속식물의 피도는 10% 이하이다. 중간정도의 snowbed 조건에서 주로 나타나는 경향이 있는 북극이끼장구채가 종종 발견 된다.

Class 7 : 식물은 2-4종이 분포하며 존재하는 식물 종수가 낮은 class. 생물학적 토양 피각과 지의류의 피도는 15-20% 범위이다. 이끼류와 관속식물은 주로 1-4, 4-5% 수준으로 낮으며 주요 식생은 자주벼의 귀와 북극콩버들이다.

Class 8 : 식물은 2-7종이 분포한다. 생물학적 토양 피각의 피도가 15-70%로 매우 높으나, 지의류는 15-20% 수준이다. 이끼류는 3-4%이고 관속식물의 피도는 약 20%이다. 여러 식물 종으로 구성된 지역도 있지만, 자주벼의 귀가 대부분의 식생 피도를 이루고 있다. *Phippsia algida*와 *Luzula nivalis*와 같은 식물의 분포는 이 지역이 중간정도의 snowbed 조건임을 나타낸다.

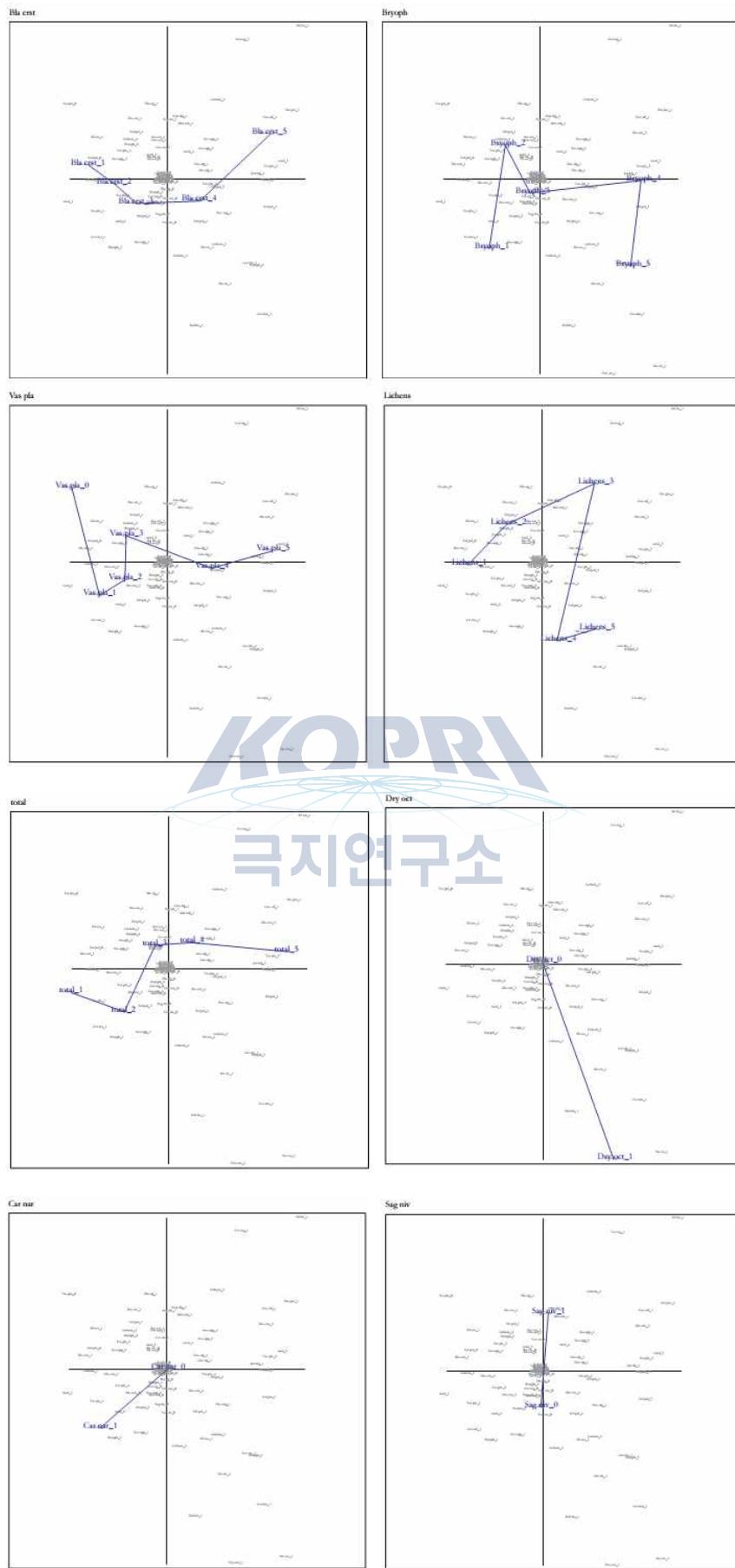


그림 1-12. 1축과 2축을 기준으로 각 식생데이터 분포의 구조 분석

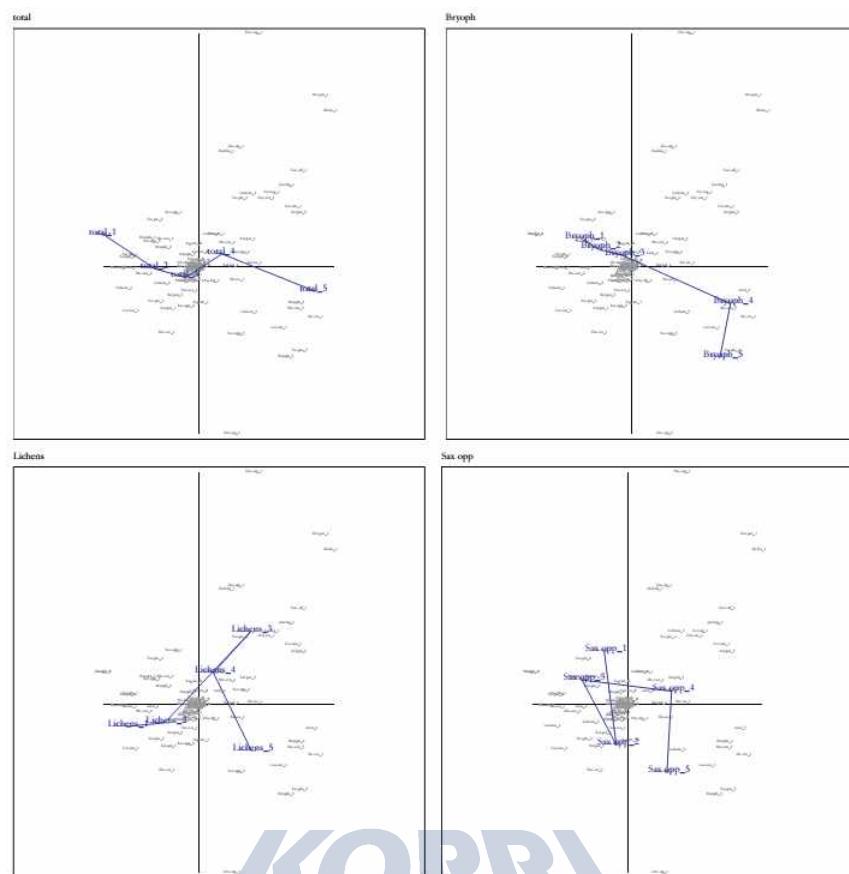


그림 1-13. 1축과 3축을 기준으로 각 식생데이터 분포의 구조 분석

극지연구소

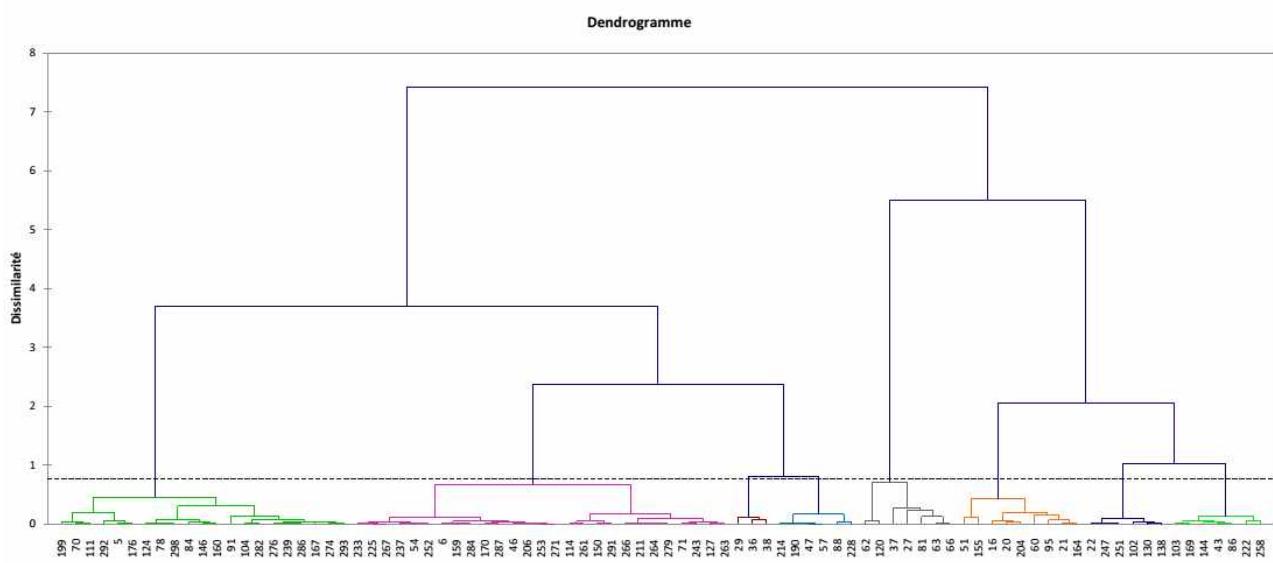


그림 1-14. 샘플링 지점의 계층적 분류

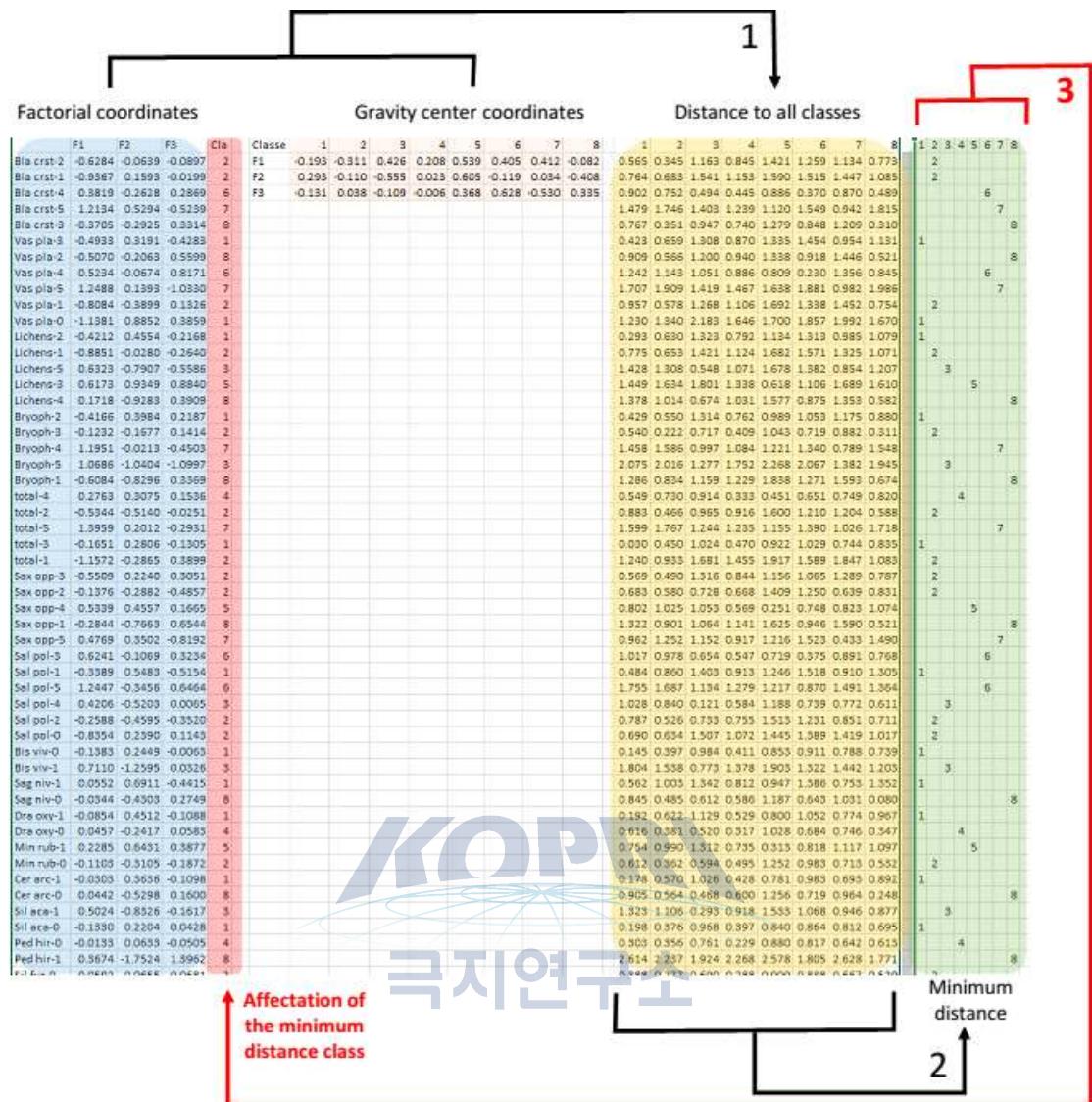


그림 1-15. 식생 자료의 class 할당

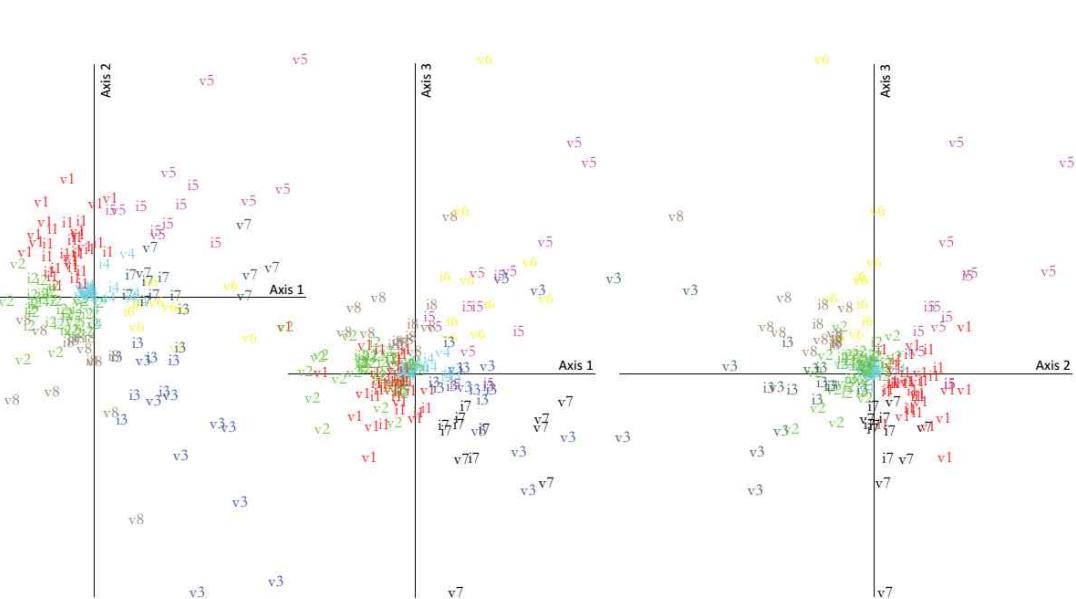


그림 1-16. Factorial space에 나타낸 class의 분포 (a) 1-2축, (b) 1-3축, (c) 2-3축

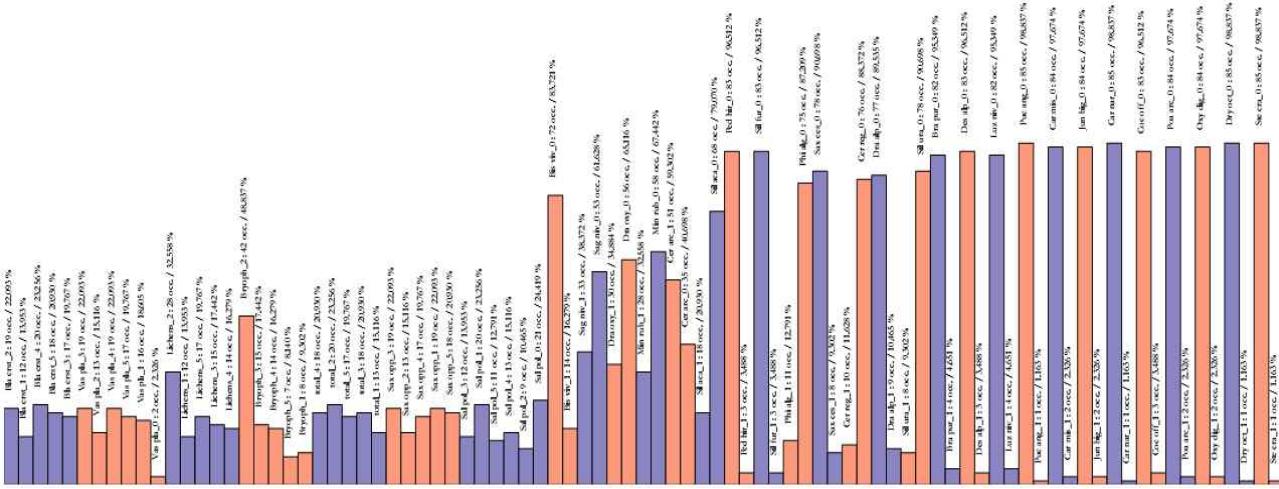


그림 1-17. 모든 class의 식생 분포 프로파일 평균값

라. 식생지도 작성

식생 자료와 class를 알고 있는 지점의 자료를 학습 집합(training set)으로 설정하고, 최대우도 추정법(maximum likelihood estimator)을 통해 식생 데이터가 없는 픽셀의 환경인자 (LIDAR DEM으로부터 고도, 사면 경사; 2013년 8월 Pleiade PAN과 MS으로부터 radiometry; Pleiade로부터 다양한 지수들 - NDVI, TNDVI, VI, Iron, WI...; 항공사진으로부터 토양 연대 및 2013년 빙하 끝에서부터 거리)를 고려하여, class를 지정함으로서 식생지도 완성하였다(그림 1-9). 분석에 사용하였던 107개 지점에 대해, 대응 인자 분석을 통해 분류된 class와 식생지도 작성을 통해 분류된 class의 일치도를 분석한 결과 99.59%의 정확도를 보였다.

중앙로 벤빙하 후퇴 지역은 주로 0, 1, 2 class가 분포하는 것으로 파악되었다. Class 0, 1, 2에는 식생이 거의 분포하지 않거나, 매우 피도가 낮은데, 이는 Class 0, 1, 2가 빙하 후퇴 시기 등을 반영하지 못하고 있음을 나타낸다. 나머지 class들은 빙하쪽 방향, 사면을 따라 빙하퇴적물의 바깥쪽 가장자리에 주로 분포하는데, 빙하에 가까운 지역보다 빙하퇴적물의 가장자리의 경관이 보다 다양하므로, 다양한 서식처를 제공하여 더 많은 class가 분포함을 알 수 있다.

3. 중앙로벤빙하 후퇴지역 유기탄소 지도

가. 토양 유기탄소 농도 및 토양 특성 분석

토양 유기탄소 농도는 빙하로부터 멀어질수록 높아지는 경향을 보였으나, 빙하가 후퇴한지 시간이 많이 지났음에도, 농도가 낮은 지점도 있었다. 때문에 향후 빙하 후퇴 시기 이외에 다른 환경 인자와의 상관관계를 분석할 필요가 있다.

빙하 후퇴 지역 내의 토성은 주로 모래 또는 사질양토(sandy loam), 빙하퇴적물 바깥쪽은 사질양토 또는 미사질 양토(silty loam)를 보였으며, 빙하후퇴지역 0~5 cm 깊이의 토양 pH는 약알칼리성(7.3~8.6)을 나타냈다.

ICP-AES를 이용하여 0~5 cm 깊이 토양의 총 인(P), 나트륨(Na), 칼륨(K), 마그네슘(Mg), 칼슘(Ca) 함량을 측정한 결과, 빙하로부터 멀어질수록 감소하는 양상을 보였으나, 다른 경향을 보이는 지점들도 있었다.

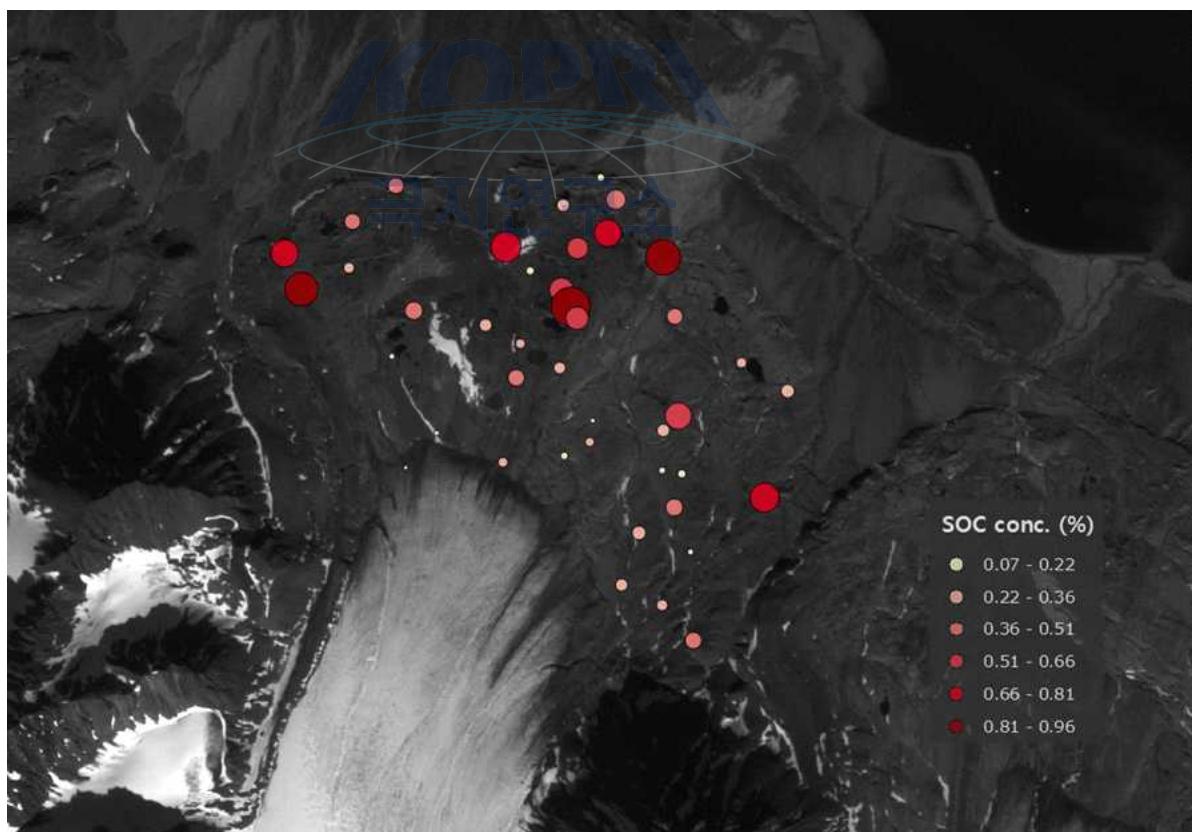


그림 1-18. 0~5 cm 깊이의 토양 유기탄소 농도의 공간적 패턴

나. 토양 유기탄소 농도 분석

토양에 1 M HCl(토양:HCl = 1:20)을 넣고, 48시간동안 정치한 후, 중류수로 행궈준 후 토양을 충분히 건조하였다. 그리고 건조한 토양을 분쇄 후, 원소분석기를 통해 분석하였다. 분석결과 토양 유기탄소 농도는 빙하로부터 멀어질수록 높아지는 경향을 보였으나, 빙하가 후퇴한지 시간이 많이 지났음에도, 농도가 낮은 지점들이 있었다(표 1-2, 그림 1-18).

다. 토양 가비중(bulk density) 분석

토성을 이용하여 가비중을 계산하는 Soil Texture Triangle Hydraulic Properties Calculator (<http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>)을 이용하였다. 분석 결과 빙하후퇴지역의 자갈을 제외한 토양의 가비중은 전반적으로 $1.4\text{--}1.6 \text{ g cm}^{-3}$ 의 범위의 값을 보였다(표 1-5).

라. 토성 분석

토양에 존재하는 유기물을 분해한 후, 모래는 습식채질(wet-sieving)을 통해 분리하고, 미사와 점토는 피펫법을 통해 함량을 계산하였다. 분석 결과 빙하후퇴지역 내의 토성은 주로 모래 또는 사질양토(sandy loam)로, 빙하퇴적물 바깥쪽은 사질양토 또는 미사질 양토(silty loam)로 측정되었다(표 1-6).

마. 토양 특성 분석

빙하후퇴지역 0~5 cm 깊이의 토양 pH는 약알칼리성으로 7.3~8.6 범위이었고, 전기전도도는 $56\text{--}121 \mu\text{cm}^{-1}$ 범위의 값을 보였다(그림 1-19). 그리고 빙하후퇴 지역 하나의 라인위의 10개 지점과, 빙하퇴적물 바깥쪽 9개 지점의 토양(0~5 cm 깊이)을 작은 입자로 분쇄하여, 강산으로 분해한 후, ICP-AES를 통해 총 인(P), 나트륨(Na), 칼륨(K), 마그네슘(Mg), 칼슘(Ca) 함량을 측정한 결과, 빙하로부터 멀어질수록 총 인, 나트륨, 칼륨, 마그네슘, 칼슘은 감소하는 패턴을 보였으나(그림 1-20), 이와는 다른 경향을 보이는 지점들이 있었다.

표 1-2. 샘플링 지점의 깊이별 토양 유기탄소 농도 (g Kg^{-1} , n=3)

Deglaci- ated yr	Site No.	D1		D2		D3		D4	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
1926	6	1.9	0.4	1.6	0.3	1.5	0.3	1.6	0.3
1931	10	3.9	2.6	1.5	0.0	1.4	0.2	1.3	0.3
1937	20	4.9	3.2	1.1	0.4	0.8	0.2	1.2	0.3
1941	25	3.1	0.7	1.3	0.2	1.2	0.1	1.4	0.2
1942	37	3.9	2.2	1.6	0.4	1.2	0.2	1.3	0.3
1944	47	6.7	4.3	1.8	0.4	1.3	0.1	1.3	0.2
1950	60	7.5	2.9	2.6	0.1	2.0	0.3	1.5	0.3
1949	62	5.2	4.9	1.0	0.2	0.9	0.1	1.2	0.4
1930	66	6.8	4.9	1.4	0.2	1.1	0.1	1.2	0.2
1934	71	8.7	3.4	1.9	0.3	1.8	0.2	1.5	0.2
1952	81	2.6	1.0	1.5	0.1	1.5	0.2	1.4	0.2
1955	84	2.0	0.6	1.5	0.6	1.3	0.1	1.1	0.1
1960	93	0.7	0.0	0.7	0.0	0.7	0.1	1.1	0.9
1950	102	8.3	1.6	5.5	3.1	4.4	3.7	3.3	1.1
1957	103	4.5	5.3	3.0	1.5	2.0	0.4	1.4	0.1
1960	120	9.6	10.4	2.0	0.3	1.5	0.3	1.4	0.3
1966	124	4.4	2.4	1.3	0.4	1.0	0.1	1.0	0.1
1948	130	4.0	1.9	1.1	0.2	0.8	0.6	1.0	0.1
1961	132	5.6	1.6	2.0	0.4	1.8	0.1	1.6	0.2
1969	138	3.1	1.5	1.2	0.3	1.1	0.0	1.2	0.2
1956	141	0.7	0.1	0.7	0.1	0.7	0.1	0.8	0.2
1951	149	0.7	0.1	0.8	0.2	0.7	0.0	0.7	0.1
1970	157	2.4	1.2	1.4	0.1	1.4	0.1	1.4	0.2
1979	170	1.5	0.8	1.2	0.2	1.2	0.2	1.6	0.4
1933	177	2.5	0.8	1.8	0.2	1.9	0.0	1.8	0.2
1970	182	2.9	1.5	2.0	0.3	2.0	0.2	1.8	0.4
1978	191	4.1	1.9	1.6	0.4	1.1	0.1	1.1	0.1
1926	204	3.3	0.7	1.9	0.3	1.4	0.2	1.3	0.1
1957	222	6.5	3.0	3.2	0.2	2.8	0.2	3.0	0.3
1977	225	1.3	0.0	1.2	0.1	1.4	0.2	2.2	0.2
1963	231	3.1	0.7	1.7	0.3	2.1	0.1	2.1	0.1
1981	237	2.2	0.4	1.3	0.3	1.5	0.3	1.6	0.0
1990	245	1.8	0.8	1.1	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1
1969	252	1.7	0.3	1.3	0.3	1.2	0.1	1.1	0.0
1965	253	2.0	1.8	1.2	0.5	1.3	0.5	1.4	0.4
1929	263	7.1	4.1	1.4	0.2	1.1	0.1	1.0	0.2
1966	266	4.2	2.2	1.3	0.2	1.3	0.3	1.5	0.5
1977	274	3.4	1.4	1.9	0.5	1.8	0.1	1.9	0.1
1949	279	1.6	0.6	1.2	0.2	1.2	0.2	1.1	0.1
1989	287	1.2	0.3	3.0	0.8	1.5	0.1	1.1	0.2
1972	292	2.8	1.4	1.3	0.1	1.3	0.1	1.2	0.1
1943	298	4.1	3.0	2.4	0.5	1.8	0.1	1.8	0.1
2006	301	2.4	0.8	0.9	0.1	0.9	0.1	1.2	0.4
2003	302	1.4	0.1	0.9	0.2	0.8	0.0	0.8	0.0
2011	303	1.1	0.2	1.1	0.1	1.2	0.1		
Outside of moraine	304	21.4	2.1	22.2	4.3	16.0	5.8	5.8	1.0
	305	23.3	7.9	9.1	3.5	6.1	3.0	3.2	0.3
	306	61.2	17.0	26.9	15.7	21.8	15.0	22.8	11.6
	307	32.2	6.4	22.9	3.7	23.7	4.1	21.2	12.6
	308	77.5	18.1	29.9	18.4	35.6	35.6	16.8	11.1
	309	62.2	11.4	36.1	8.8	22.7	9.5	7.4	1.4
	310	7.1	1.9	8.1	6.8	12.7	4.2	5.1	2.2
	311	33.1	8.5	26.6	19.6	22.9	11.7	25.9	14.2
	312	58.1	14.9	43.5	3.2	30.6	3.2	21.8	8.3

표 1-3. 샘플링 지점의 깊이별 토양 총질소 농도 (g Kg^{-1} , n=3)

Deglaci- ated yr	Site No.	D1		D2		D3		D4	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
1926	6	0.11	0.05	0.09	0.04	0.09	0.03	0.09	0.01
1931	10	0.22	0.13	0.07	0.01	0.06	0.02	0.05	0.03
1937	20	0.31	0.22	0.05	0.01	0.05	0.01	0.06	0.02
1941	25	0.21	0.07	0.07	0.01	0.06	0.01	0.07	0.02
1942	37	0.25	0.16	0.08	0.02	0.06	0.00	0.06	0.01
1944	47	0.44	0.30	0.10	0.03	0.07	0.01	0.06	0.01
1950	60	0.47	0.23	0.13	0.01	0.09	0.02	0.06	0.02
1949	62	0.34	0.33	0.05	0.02	0.05	0.01	0.06	0.02
1930	66	0.40	0.30	0.06	0.01	0.05	0.00	0.06	0.02
1934	71	0.57	0.21	0.11	0.00	0.10	0.01	0.08	0.01
1952	81	0.14	0.07	0.06	0.01	0.05	0.00	0.05	0.00
1955	84	0.11	0.05	0.06	0.03	0.05	0.01	0.04	0.01
1960	93	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.03
1950	102	0.35	0.08	0.19	0.10	0.14	0.11	0.10	0.03
1957	103	0.26	0.32	0.18	0.11	0.11	0.04	0.07	0.02
1960	120	0.58	0.60	0.11	0.02	0.07	0.01	0.06	0.01
1966	124	0.28	0.15	0.06	0.03	0.05	0.01	0.05	0.00
1948	130	0.24	0.10	0.05	0.01	0.03	0.02	0.05	0.00
1961	132	0.36	0.10	0.10	0.03	0.09	0.02	0.09	0.01
1969	138	0.18	0.09	0.06	0.01	0.05	0.00	0.06	0.02
1956	141	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.00
1951	149	0.03	0.01	0.06	0.04	0.04	0.01	0.04	0.00
1970	157	0.16	0.08	0.09	0.01	0.08	0.02	0.08	0.01
1979	170	0.10	0.06	0.06	0.01	0.07	0.01	0.13	0.06
1933	177	0.18	0.06	0.12	0.02	0.12	0.02	0.11	0.01
1970	182	0.18	0.12	0.10	0.02	0.10	0.01	0.09	0.02
1978	191	0.29	0.13	0.10	0.03	0.06	0.01	0.05	0.00
1926	204	0.23	0.06	0.13	0.02	0.09	0.02	0.07	0.01
1957	222	0.44	0.18	0.23	0.02	0.20	0.03	0.20	0.02
1977	225	0.07	0.03	0.06	0.01	0.06	0.01	0.11	0.02
1963	231	0.22	0.10	0.10	0.04	0.15	0.02	0.17	0.01
1981	237	0.14	0.04	0.07	0.01	0.07	0.00	0.08	0.01
1990	245	0.13	0.05	0.07	0.01	0.06	0.01	0.06	0.02
1969	252	0.08	0.02	0.05	0.01	0.05	0.00	0.05	0.01
1965	253	0.11	0.12	0.06	0.04	0.07	0.05	0.07	0.04
1929	263	0.42	0.27	0.06	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01
1966	266	0.24	0.15	0.06	0.02	0.05	0.02	0.07	0.02
1977	274	0.23	0.08	0.12	0.03	0.11	0.02	0.11	0.01
1949	279	0.08	0.04	0.05	0.01	0.05	0.01	0.04	0.00
1989	287	0.06	0.01	0.20	0.07	0.08	0.01	0.06	0.02
1972	292	0.17	0.11	0.06	0.00	0.06	0.01	0.05	0.00
1943	298	0.25	0.20	0.12	0.04	0.08	0.01	0.08	0.01
2006	301	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.06	0.01
2003	302	0.08	0.01	0.04	0.01	0.04	0.00	0.05	0.00
2011	303	0.04	0.01	0.04	0.00	0.04	0.00		
Outside of moraine	304	1.84	0.19	1.93	0.26	1.31	0.59	0.4	0.1
	305	1.65	0.43	0.62	0.25	0.38	0.24	0.2	0.0
	306	4.81	1.16	2.37	1.38	1.96	1.43	2.0	1.1
	307	2.98	0.45	2.28	0.16	2.47	0.31	2.2	1.3
	308	7.20	1.37	2.83	1.59	3.39	3.41	1.6	1.0
	309	4.67	0.38	3.08	1.17	1.89	0.85	0.6	0.1
	310	0.51	0.16	0.55	0.47	0.95	0.35	0.4	0.2
	311	2.77	0.59	2.31	1.49	2.05	0.84	2.2	0.9
	312	4.73	1.09	3.88	0.15	2.73	0.28	1.9	0.9

표 1-4. 샘플링 지점의 깊이별 토양 탄질비(n=3)

Deglaci- ated yr	Site No.	D1		D2		D3		D4	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
1926	6	17.8	2.9	17.9	4.7	18.5	4.1	18.9	2.0
1931	10	18.2	3.7	21.6	2.1	25.5	5.6	29.8	12.9
1937	20	15.9	1.0	22.3	4.1	18.4	1.5	20.3	2.0
1941	25	15.3	2.3	19.5	0.8	20.9	1.9	22.0	3.2
1942	37	17.1	3.7	20.8	1.1	19.9	2.3	20.4	0.6
1944	47	15.6	1.2	19.1	2.1	19.4	1.2	21.0	1.0
1950	60		1.8	20.5	0.1	22.0	1.9	24.7	3.3
1949	62	15.7	1.5	19.8	2.4	18.6	2.7	19.4	1.8
1930	66	18.0	2.9	22.2	3.6	23.8	2.2	21.2	2.3
1934	71	15.1	0.3	17.2	1.9	18.5	0.4	19.5	1.0
1952	81	19.4	2.7	27.1	2.5	26.6	2.7	26.9	1.9
1955	84	19.2	4.2	23.2	3.1	25.4	4.7	26.0	7.0
1960	93	24.3	3.2	23.8	2.6	24.9	3.4	25.8	4.8
1950	102	23.6	2.1	28.6	1.0	29.7	2.6	33.8	0.9
1957	103	16.1	0.7	17.2	2.0	19.7	2.5	20.2	2.5
1960	120	16.2	1.1	17.6	0.7	20.3	2.2	21.9	2.6
1966	124	15.2	0.7	21.6	4.7	22.6	5.3	22.0	2.6
1948	130	16.6	1.3	23.7	1.8	23.1	4.4	22.9	1.2
1961	132	15.8	1.1	20.0	2.8	20.0	3.5	17.4	0.3
1969	138	17.4	1.3	22.0	0.5	22.4	0.6	20.0	2.2
1956	141	19.3	2.1	30.3	7.9	31.8	16.2	28.7	7.8
1951	149	25.4	7.5	18.0	8.3	17.8	2.7	20.0	2.6
1970	157	15.2	1.1	15.9	3.0	16.9	2.8	16.4	0.7
1979	170	15.3	1.1	19.4	2.2	17.7	1.5	14.4	4.7
1933	177	13.9	1.0	15.2	0.3	16.3	2.0	16.2	2.7
1970	182	17.1	2.1	20.2	3.0	19.6	1.1	19.2	0.9
1978	191	13.9	0.4	17.0	1.6	20.4	3.0	20.4	1.0
1926	204	14.7	1.1	15.4	1.5	15.4	1.7	17.3	0.9
1957	222	14.6	1.1	13.8	1.8	14.1	2.1	15.1	0.6
1977	225	19.5	6.4	21.8	5.9	22.7	2.1	19.5	2.7
1963	231	15.0	3.3	17.2	5.0	13.8	1.4	12.6	1.2
1981	237	16.5	1.9	20.1	1.3	21.6	2.5	21.0	2.6
1990	245	14.6	0.1	15.3	2.5	16.2	3.0	17.3	5.4
1969	252	20.5	0.9	25.4	2.2	22.3	3.5	23.6	3.5
1965	253	20.5	3.8	21.3	4.8	22.2	10.2	21.6	8.1
1929	263	19.0	4.2	23.7	1.5	23.8	3.2	23.7	3.4
1966	266	17.9	4.0	21.6	5.2	25.8	4.9	22.3	2.5
1977	274	14.6	1.8	16.4	2.2	17.2	3.5	16.9	1.2
1949	279	20.6	3.4	23.1	1.6	24.5	2.6	24.5	1.9
1989	287	22.2	2.9	15.3	1.2	19.4	1.8	20.4	4.9
1972	292	17.1	2.0	22.2	0.9	22.2	2.1	22.6	1.4
1943	298	17.3	2.1	20.5	3.9	23.2	1.9	21.8	1.1
2006	301	16.0	1.5	20.8	3.8	19.7	2.1	18.8	5.0
2003	302	17.8	1.4	20.7	1.9	19.1	2.1	17.5	1.0
2011	303	25.1	1.1	26.9	1.5	26.8	2.1		
Outside of moraine	304	11.7	0.6	11.4	1.0	12.5	1.3	15.3	0.8
	305	13.9	1.4	14.8	0.3	16.9	2.6	19.0	1.1
	306	12.6	0.6	11.4	0.0	11.3	0.5	11.5	0.8
	307	10.7	0.5	10.0	1.1	9.5	0.4	9.9	0.5
	308	10.7	0.7	10.4	0.5	10.5	0.1	10.6	0.2
	309	13.4	2.6	12.1	1.4	12.1	0.4	12.5	0.1
	310	14.1	0.8	14.9	0.9	13.5	0.7	13.6	2.0
	311	11.9	0.5	11.0	1.5	10.9	1.4	11.4	1.8
	312	12.2	0.5	11.2	0.5	11.2	0.5	11.8	1.0

표 1-5. 각 샘플링 지점별 토양 가비중 (g cm^{-3})

Deglaciated Year	Site No.	D1	D2	D3	D4
1937	20	1.49			1.40
1941	25	1.45	1.47	1.48	1.47
1942	37	1.46	1.63		1.62
1944	47	1.61	1.61	1.60	1.62
1950	60	1.64	1.63		
1949	62	1.55		1.54	
1934	71	1.63	1.62	1.62	1.62
1952	81	1.53	0.56	1.52	1.60
1950	102	1.62	1.62		1.63
1957	103	1.63	1.63		1.60
1960	120	1.62	1.63	1.63	1.63
1961	132	1.63	1.63	1.63	1.63
1969	138	1.65	1.59	1.63	1.63
1956	141	1.52	1.52	1.52	1.52
1970	157	1.58	1.61	1.63	1.63
1979	170	1.54	1.61	1.63	1.63
1970	182	1.63	1.63	1.63	1.63
1978	191	1.63	1.63	1.63	1.63
1957	222	1.63	1.63	1.63	1.63
1977	225	1.53	1.53	1.56	1.62
1963	231	1.58	1.60	1.63	1.63
1990	245	1.61	1.60	1.58	1.57
1929	263	1.61	1.62	1.62	
1966	266	1.55	1.54	1.55	1.54
1977	274	1.64	1.64	1.64	1.64
1989	287	1.67	1.66	1.66	1.66
1972	292	1.64	1.64	1.64	1.64
1943	298	1.63	1.63	1.63	1.64
2006	301	1.65	1.63	1.63	1.64
2003	302	1.64	1.65	1.63	
Outside of moraine	304	1.66	1.67	1.66	1.59
	305	1.64	1.61	1.59	1.56
	306	1.65	1.66	1.66	1.66
	307	1.64	1.66	1.67	1.68
	308	1.65	1.62	1.63	1.63
	309	1.65	1.66		
	310	1.62	1.63	1.64	1.63
	311	1.67	1.66	1.65	1.65
	312	1.65	1.66	1.66	

표 1-6. 중앙로벤 빙하후퇴지역과 빙하퇴적물 바깥쪽의 토성(%)

Year	No.	D1				D2				D3				D4			
		Sand	Silt	Clay	Texture												
1926	6	87.8	10.0	2.3	sand	86.0	11.4	2.6	loamy sand	84.3	12.8	2.9	loamy sand	84.3	12.4	3.3	loamy sand
1931	10	0.0	92.8	7.2	silt	60.3	31.5	8.1	sandy loam	57.1	33.2	9.7	sandy loam	58.5	33.4	8.1	sandy loam
1937	20	86.1	12.2	1.7	sand	92.6	3.4	3.9	sand					87.5	11.1	1.4	sand
1941	25	77.8	13.6	8.5	sandy loam	59.6	37.2	3.2	sandy loam	51.9	36.6	11.5	sandy loam	51.8	36.6	11.6	sandy loam
1942	37	65.6	28.2	6.2	sandy loam	62.9	28.8	8.3	sandy loam	63.1	28.9	8.0	sandy loam	63.8	30.4	5.8	sandy loam
1944	47	70.4	26.9	2.7	sandy loam	71.9	22.3	5.8	sandy loam	75.6	18.7	5.7	loamy sand	77.1	17.5	5.3	sandy loam
1950	60	53.7	36.1	10.1	sandy loam	52.5	35.4	12.1	sandy loam	50.7	37.2	12.1	loam	53.0	34.7	11.9	sandy loam
1949	62	84.6	13.6	1.8	sand					90.9	7.3	1.8	sand				
1930	66	83.5	14.9	1.6	loamy sand	80.1	18.0	1.9	loamy sand	76.9	20.4	2.7	loamy sand	57.9	37.1	5.0	sandy loam
1934	71	57.9	31.8	10.2	sandy loam	45.3	37.9	16.8	loam	47.5	36.2	16.2	loam	46.1	38.3	15.6	loam
1952	81	93.0	5.2	1.7	sand	94.7	3.5	1.8	sand	96.0	2.6	1.4	sand	75.6	19.3	5.1	loamy sand
1955	84	89.6	7.9	2.4	sand	67.4	24.8	7.8	sandy loam	65.2	27.3	7.5	sandy loam	67.6	24.0	8.4	sandy loam
1960	93	90.4	7.7	1.8	sand	95.9	3.4	0.7	sand	94.1	5.8	0.1	sand	95.8	3.1	1.1	sand
1950	102	41.8	41.5	16.7	loam	42.6	40.3	17.1	loam	46.3	38.3	15.4	loam	50.1	38.1	11.8	loam
1957	103	62.4	30.7	6.9	sandy loam	59.5	32.3	8.2	sandy loam	47.9	45.0	7.1	sandy loam	74.8	19.2	5.9	sandy loam
1960	120	66.0	26.5	7.5	sandy loam	60.1	30.4	9.5	sandy loam	57.3	31.7	10.9	sandy loam	53.0	34.7	12.4	sandy loam
1966	124	57.1	33.9	9.0	sandy loam	67.6	23.5	8.9	sandy loam	63.1	27.0	9.9	sandy loam	54.1	33.0	12.8	sandy loam
1948	130	85.3	11.3	3.3	loamy sand	89.2	7.4	3.4	sand	91.2	5.3	3.5	sand	91.7	4.7	3.7	sand
1961	132	49.8	38.1	12.0	loam	50.2	36.6	13.2	loam	50.5	36.5	12.9	loam	65.6	25.4	9.0	sandy loam
1969	138	45.8	46.7	7.5	sandy loam	80.3	14.4	5.3	loamy sand	64.1	27.0	9.0	sandy loam	59.5	30.8	9.8	sandy loam
1956	141	96.8	1.3	1.8	sand	96.2	2.9	1.0	sand	95.4	3.5	1.0	sand	97.0	2.1	0.9	sand
1951	149	97.6	1.6	0.8	sand	96.5	2.6	0.8	sand	96.4	2.8	0.8	sand	93.7	5.0	1.4	sand
1970	157	79.2	18.9	2.0	loamy sand	69.2	28.3	2.5	sandy loam	55.2	34.0	10.8	sandy loam	54.7	33.3	12.0	sandy loam
1979	170	88.7	9.7	1.6	sand	71.4	24.2	4.4	sandy loam	50.0	36.4	13.6	loam	49.1	36.6	14.3	loam
1933	177	52.5	37.9	9.6	sandy loam	43.3	48.9	7.9	loam	31.6	57.8	10.6	silty loam	54.8	34.6	10.6	sandy loam
1970	182	60.1	33.4	6.5	sandy loam	52.0	35.6	12.4	sandy loam	50.2	37.4	12.4	loam	47.2	40.3	12.4	loam
1978	191	60.2	34.9	4.9	sandy loam	52.7	34.6	12.7	sandy loam	49.9	35.6	14.6	loam	50.2	35.5	14.3	loam
1926	204	88.5	8.8	2.6	sand	89.2	7.9	2.9	sand	90.1	7.5	2.3	sand	87.4	10.6	2.0	sand
1957	222	54.7	33.9	11.5	sandy loam	54.2	30.8	15.0	sandy loam	53.9	31.0	15.1	sandy loam	53.6	31.6	14.8	sandy loam
1977	225	93.4	5.1	1.5	sand	93.0	5.3	1.7	sand	85.4	12.8	1.7	loamy sand	68.0	25.4	6.6	sandy loam

표 1-6. 중앙로벤 빙하후퇴지역과 빙하퇴적물 바깥쪽의 토성 (계속)

Year	No.	D1				D2				D3				D4			
		Sand	Silt	Clay	Texture												
1963	231	78.0	18.6	3.4	loamy sand	71.5	24.6	3.9	sandy loam	63.2	29.1	7.7	sandy loam	52.0	34.1	13.9	sandy loam
1981	237	58.7	33.4	7.9	sandy loam	72.0	24.7	3.2	sandy loam	77.2	19.9	2.9	loamy sand	73.6	23.0	3.3	loamy sand
1990	245	68.3	29.0	2.7	sandy loam	72.2	25.6	2.2	loamy sand	78.1	19.4	2.5	loamy sand	80.3	18.5	1.2	loamy sand
1969	252	92.8	6.0	1.2	sand	91.6	4.7	3.7	sand	91.7	7.3	1.1	sand	92.9	6.1	1.0	sand
1965	253	85.6	13.4	1.0	loamy sand	77.9	20.7	1.4	loamy sand	77.8	20.5	1.7	loamy sand	73.3	23.9	2.8	loamy sand
1929	263	67.9	29.0	3.1	sandy loam	67.0	29.3	3.8	sandy loam	64.3	30.0	5.8	sandy loam				
1966	266	88.2	10.0	1.8	sand	88.8	9.5	1.7	sand	87.6	10.9	1.5	sand	90.7	8.0	1.3	sand
1977	274	53.9	37.1	9.0	sandy loam	52.9	35.9	11.2	sandy loam	52.2	36.7	11.1	sandy loam	54.3	35.3	10.5	sandy loam
1949	279	90.4	8.0	1.6	sand	86.1	12.3	1.5	sand	86.2	11.7	2.2	sand	67.5	28.2	4.3	sandy loam
1989	287	35.3	60.2	4.6	silty loam	43.8	50.1	6.1	silty loam	36.8	56.7	6.5	silty loam	44.4	50.9	4.7	silty loam
1972	292	53.1	39.8	7.1	sandy loam	44.8	45.1	10.1	loam	46.0	43.7	10.3	loam	53.2	38.0	8.8	sandy loam
1943	298	59.8	31.8	8.5	sandy loam	58.5	33.8	7.7	sandy loam	59.5	33.0	7.5	sandy loam	55.9	35.5	8.6	sandy loam
2006	301	49.9	47.5	2.6	sandy loam	51.4	34.9	13.7	loam	46.6	37.5	15.9	loam	55.0	30.9	14.0	sandy loam
2003	302	51.9	36.0	12.1	sandy loam	50.3	36.6	13.1	loam	49.9	35.4	14.7	loam				
2011	303	50.2	38.7	11.1	loam	45.6	39.5	14.9	loam	45.9	39.5	14.6	loam				
Outside of moraine	304	42.7	52.9	4.5	silty loam	40.7	55.1	4.2	silty loam	48.2	47.3	4.4	sandy loam	77.5	19.5	3.0	loamy sand
	305	57.2	39.0	3.8	sandy loam	70.3	27.6	2.1	sandy loam	75.8	22.2	1.9	loamy sand	83.6	14.2	2.2	sand
	306	48.9	47.5	3.6	sandy loam	46.4	49.3	4.3	silty loam	45.9	49.6	4.4	silty loam	44.3	52.9	2.9	silty loam
	307	58.6	37.6	3.8	silty loam	46.8	50.6	2.6	silty loam	39.5	56.7	3.8	silty loam	21.2	74.0	4.8	silty loam
	308	54.1	40.5	5.4	sandy loam	66.1	29.4	4.5	sandy loam	63.5	32.3	4.2	sandy loam	65.0	30.7	4.4	sandy loam
	309	15.4	75.8	8.9	silty loam	14.8	77.1	8.1	silty loam								
	310	66.3	28.6	5.1	sandy loam	60.8	32.7	6.5	sandy loam	54.6	39.0	6.4	sandy loam	65.2	30.4	4.4	sandy loam
	311	20.4	72.5	7.1	silty loam	25.2	67.4	7.4	silty loam	17.0	73.8	9.2	silty loam	24.8	64.9	10.3	silty loam
	312	39.3	52.8	7.8	silty loam	41.2	53.1	5.7	silty loam	36.2	57.2	6.6	silty loam				

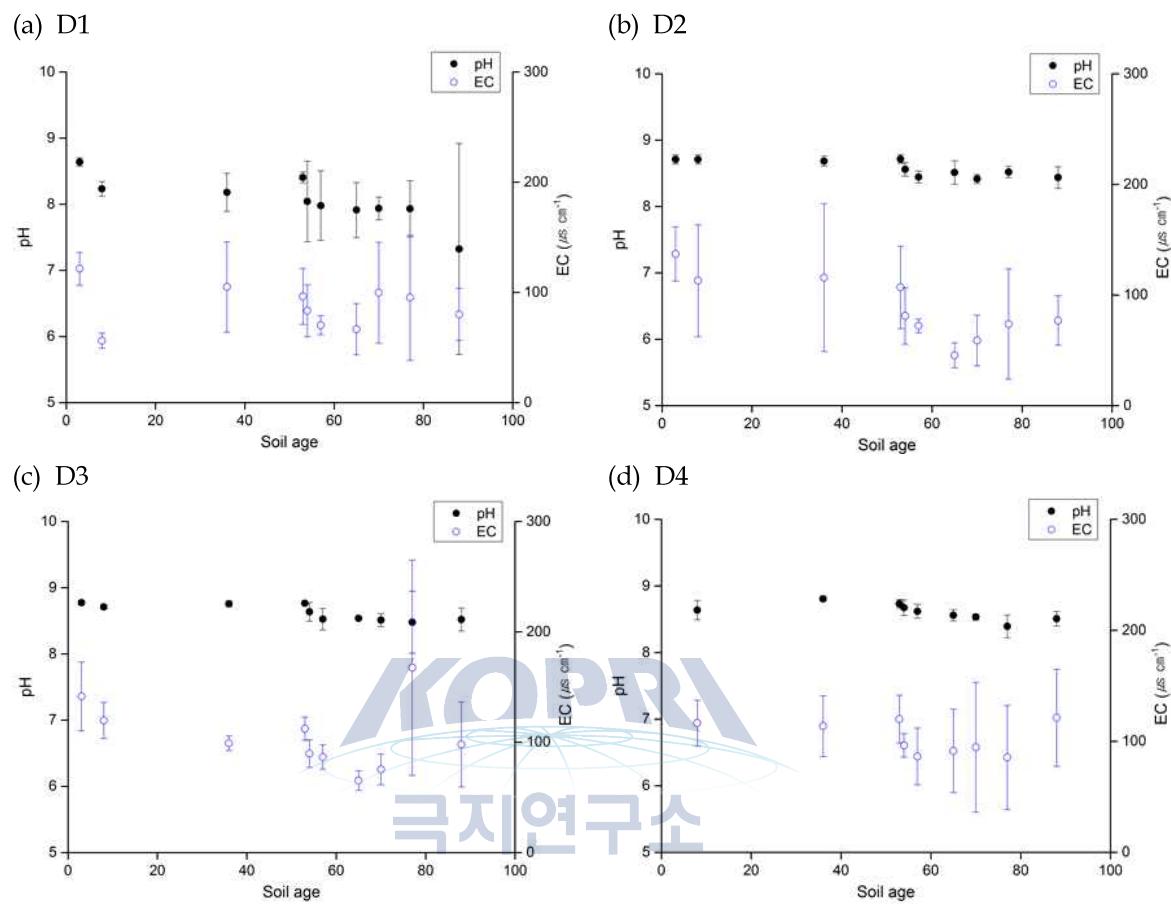


그림 1-19. 중앙로변 빙하후퇴지역의 토양 pH 및 전기전도도

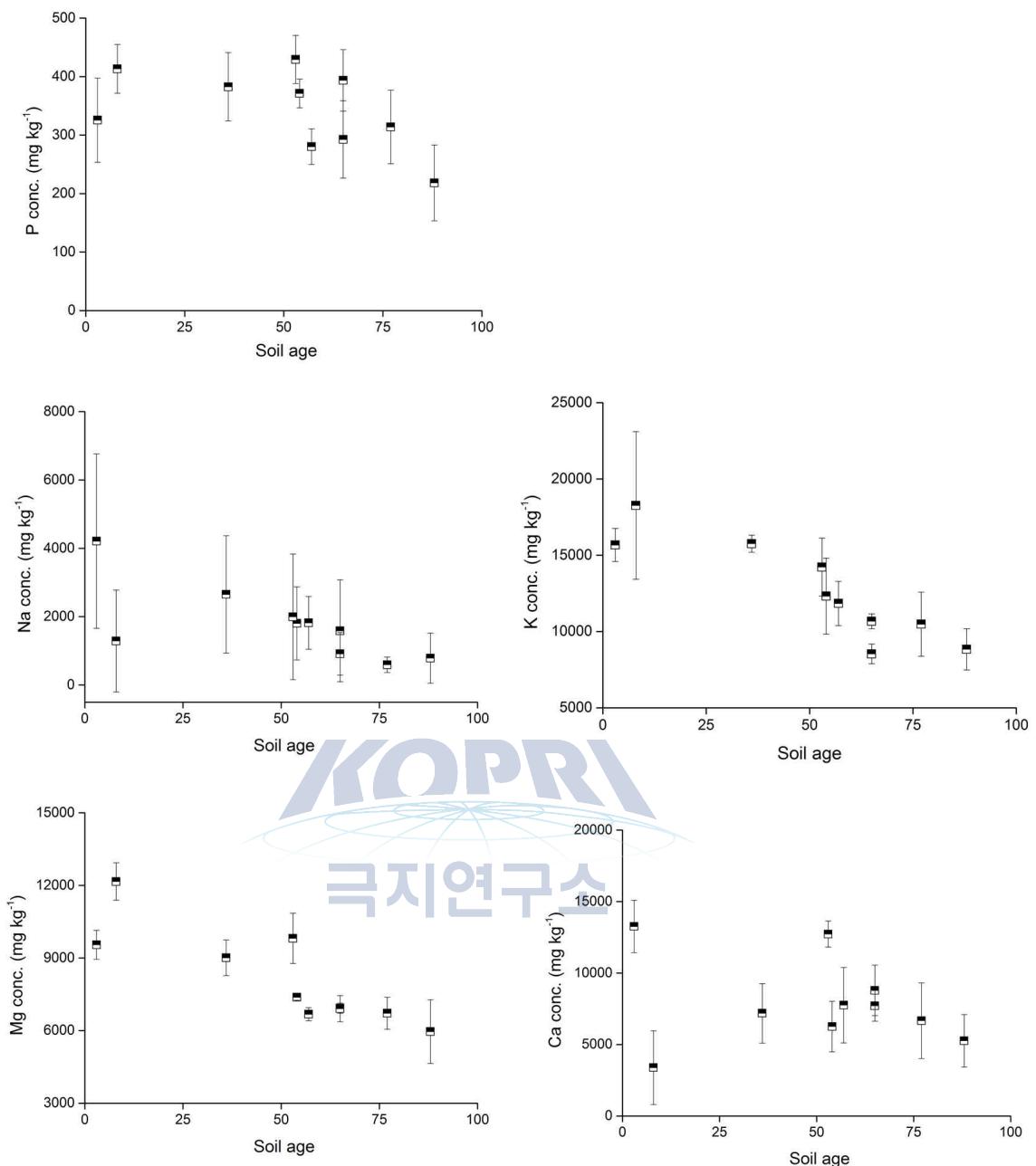


그림 1-20. 중앙로벤 빙하후퇴지역과 빙하퇴적물 바깥쪽 지점 0-5 cm 깊이 토양의 원소 함량

바. 단위면적당 토양 유기탄소 저장량 계산

토양 유기탄소 저장량 ($\text{Mg C/m}^2 \text{ soil}$)

$$= \text{C 농도 } (\text{Mg C/Mg soil}) \times \text{가밀도}^* (\text{Mg soil/m}^3 \text{ soil}) \times \text{토양 깊이} (\text{m})$$

와 같이 계산되며 이 때 가밀도는 $\text{BD}_{\text{hybrid}}$ 방법을 이용하였다(Throop et al., 2012).

$\text{BD}_{\text{hybrid}} = \text{mass of the fine earth } (< 2\text{mm particle size fraction}) \text{ divided by}$
the volume of the entire soil pit

30 cm 깊이까지의 유기탄소 저장량 계산결과 범위 $1.52\text{--}15.42 \text{ Mg ha}^{-1}$, 평균 5.45 Mg ha^{-1} 값을 나타냈다(표 1-7). 이 중에서 토양 5-10, 10-20, 20-30 cm 깊이에서는 유기탄소의 농도가 서로 차이 나지 않았지만, 0-5 cm 깊이에서는 유기탄소 농도의 차이가 나타났다. 이것으로 유기탄소 저장량이 표층 0-5 cm 깊이의 유기탄소 농도와 밀접한 상관관계가 있음을 나타냈다($r = 0.79$, 표 1-8). 유기탄소 저장량은 자갈과 토양의 비율($r = -0.58$)과 관속식물의 빈도의 합($r = 0.59$)에 영향을 받았다(표 1-8, 그림 1-21). 그렇기에 하천 범람을 한 번도 받지 않았던 지점의 유기탄소 저장량이 과거에 하천 범람의 영향을 받았거나, 현재 하천 범람이 일어나는 지점에 비해서 유의하게 높았다(그림 1-22).



표 1-7. 빙하후퇴지역 30 cm 깊이까지의 유기탄소 저장량 (단위: Mg ha⁻¹)

ML	Site No.	Mgravel/M soil	Sand	Silt	Clay	SOC_top	SOC_CV	TN_top	C/N ratio	BD_hybrid	Stock_hybrid
ML	6	1.71	87.78	9.95	2.27	0.19	22.20	0.01	17.77	0.78	3.98
ML	10	1.27	61.30	31.95	6.75	0.39	67.18	0.02	18.21	0.91	5.00
ML	20	1.20	86.08	12.21	1.71	0.49	66.69	0.03	15.91	0.90	4.41
ML	25	0.98	77.83	13.64	8.53	0.31	23.07	0.02	15.30	1.01	5.28
ML	37	0.94	65.61	28.20	6.19	0.39	56.47	0.02	17.08	1.01	5.39
ML	47	1.00	70.38	26.91	2.71	0.67	64.10	0.04	15.64	0.97	6.16
ML	60	0.70	53.71	36.14	10.14	0.75	38.50	0.05	16.44	1.08	8.81
ML	62	1.16	84.59	13.57	1.84	0.52	93.60	0.03	15.71	0.92	4.62
ML	66	0.90	83.52	14.93	1.55	0.68	71.65	0.04	18.00	1.00	6.13
ML	71	0.94	57.95	31.84	10.21	0.87	38.79	0.06	15.14	1.00	8.87
ML	81	0.80	93.04	5.25	1.71	0.26	36.54	0.01	19.38	1.04	4.54
ML	84	1.17	89.65	7.92	2.43	0.20	30.82	0.01	19.19	0.92	3.72
ML	93	1.73	90.44	7.73	1.83	0.07	5.22	0.00	24.29	0.78	1.99
ML	102	0.65	41.83	41.50	16.67	0.83	19.15	0.04	23.63	1.10	15.42
ML	103	0.95	62.42	30.73	6.85	0.59	73.02	0.04	16.11	0.98	5.69
ML	120	1.28	66.02	26.52	7.46	0.96	108.32	0.06	16.21	0.82	7.81
ML	124	0.68	57.10	33.88	9.02	0.44	55.82	0.03	15.16	1.12	5.15
ML	130	0.57	85.32	11.33	3.35	0.40	47.39	0.02	16.90	1.15	4.18
ML	132	0.52	49.84	38.12	12.04	0.56	28.11	0.04	15.75	1.20	8.50
ML	138	1.17	45.75	46.75	7.50	0.31	46.62	0.02	17.41	0.94	4.46
ML	141	1.51	96.84	1.32	1.83	0.07	13.36	0.00	19.33	0.82	1.52
ML	149	1.59	97.58	1.63	0.80	0.07	11.42	0.00	20.82	0.80	1.64
ML	157	1.12	79.17	18.87	1.95	0.24	48.12	0.02	15.19	0.94	4.61
ML	170	2.18	88.72	9.65	1.63	0.15	54.30	0.01	15.32	0.68	4.27
ML	177	-	52.55	37.85	9.60	0.25	31.33	0.02	13.85	-	-
ML	182	1.02	60.13	33.36	6.51	0.29	52.22	0.02	17.07	0.99	6.45
ML	191	1.37	60.19	34.87	4.95	0.41	46.38	0.03	13.93	0.87	4.96
ML	204	-	88.54	8.82	2.63	0.33	20.84	0.02	14.71	-	-
ML	222	0.31	54.67	33.88	11.46	0.64	43.92	0.04	14.94	1.28	11.53
ML	225	1.54	60.13	33.36	6.51	0.13	2.33	0.01	19.52	0.84	4.52
ML	231	1.01	78.03	18.59	3.38	0.31	22.32	0.02	14.98	0.98	6.60
ML	237	0.69	58.74	33.36	7.89	0.22	19.34	0.01	16.52	1.14	4.74
ML	245	0.89	68.28	29.04	2.68	0.18	42.79	0.01	14.59	1.04	3.21
ML	252	1.57	92.78	5.98	1.23	0.17	17.09	0.01	20.49	0.81	2.65
ML	253	0.69	85.62	13.43	0.96	0.20	91.22	0.01	20.84	1.11	4.70
ML	263	1.00	67.89	29.00	3.10	0.71	56.83	0.04	18.99	0.96	6.72
ML	266	1.09	88.24	10.01	1.75	0.44	53.72	0.02	18.78	0.93	4.93
ML	274	1.02	53.88	37.08	9.03	0.34	40.37	0.02	14.56	0.99	6.57
ML	279	1.10	90.44	7.96	1.59	0.16	39.44	0.01	20.65	0.94	3.00
ML	287	0.81	35.25	60.19	4.55	0.30	25.58	0.02	15.28	1.08	4.53
ML	292	1.08	53.13	39.80	7.07	0.28	49.18	0.02	17.07	0.97	4.76
ML	298	1.16	59.76	31.78	8.46	0.44	59.10	0.03	16.21	0.93	6.13
ML	301	-	49.91	47.47	2.63	0.24	31.23	0.02	16.05	-	-
ML	302	-	51.87	36.00	12.14	0.14	10.87	0.01	17.80	-	-
ML	303	-	50.16	38.70	11.14	0.11	15.71	0.00	25.11	-	-
ML	304	0.05	42.67	52.88	4.45	2.14	9.61	0.18	11.66	1.24	45.83
ML	305	0.09	57.22	38.98	3.80	2.33	33.78	0.17	13.88	1.15	23.40
ML	306	0.26	48.92	47.46	3.62	6.12	27.84	0.48	12.64	0.82	64.30
ML	307	1.31	58.58	37.60	3.82	3.22	19.86	0.30	10.73	0.75	54.20
ML	308	0.95	54.08	40.48	5.44	7.75	23.31	0.72	10.71	0.70	64.02
ML	309	0.08	15.36	75.77	8.87	6.22	18.33	0.47	13.38	0.75	68.99
ML	310	0.00	66.30	28.58	5.12	0.71	26.58	0.05	14.08	1.50	34.50
ML	311	0.41	20.40	72.54	7.05	3.39	21.92	0.28	12.22	0.97	60.83
ML	312	0.98	39.34	52.82	7.84	5.81	25.58	0.47	12.21	0.67	75.74

표 1-8. 측정 항목 간 피어슨 상관계수

	Gravel	SOC _{con}	Sand	Clay	SOC _{FE}	SOC _{hy}	BC	Li	Bryo	VP	TotCov	Freq	Age
Gravel	1.00												
SOC _{con}	-0.50	1.00											
Sand	0.50	-0.47	1.00										
Clay	-0.52	0.53	-0.82	1.00									
SOC _{FE}	-0.52	0.81	-0.61	0.78	1.00								
SOC _{hy}	-0.58	0.79	-0.63	0.81	0.99	1.00							
BC	-0.19	0.53	-0.22	0.20	0.31	0.26	1.00						
Li	-0.47	0.42	-0.20	0.29	0.48	0.49	0.21	1.00					
Bryo	-0.26	0.50	-0.25	0.31	0.43	0.39	0.73	0.50	1.00				
VP	-0.25	0.48	-0.23	0.28	0.36	0.32	0.87	0.33	0.86	1.00			
TotCov	-0.26	0.57	-0.25	0.27	0.39	0.35	0.97	0.37	0.84	0.95	1.00		
Freq	-0.57	0.62	-0.43	0.54	0.59	0.59	0.52	0.42	0.52	0.58	0.59	1.00	
Age	0.04	-0.38	-0.26	0.08	-0.19	-0.15	-0.04	-0.18	-0.10	-0.01	-0.05	-0.27	1.00

Gravel: gravel to soil ratio; SOC_{con}: SOC content for 0-5 cm depth; Sand: proportion of sand; Clay: proportion of clay; SOC_{FE}: SOC stock of fine earth (< 2 mm); SOC_{hy}: SOC stock calculated by a hybrid method; BC: coverage of black crust; Li: coverage of lichen; Bryo: coverage of bryophyte; VP: coverage of vascular plant; TotCov: the sum of coverage of black crust, lichen, bryophyte, and vascular plant; Freq: sum of each plant frequency; Age: years since deglaciation

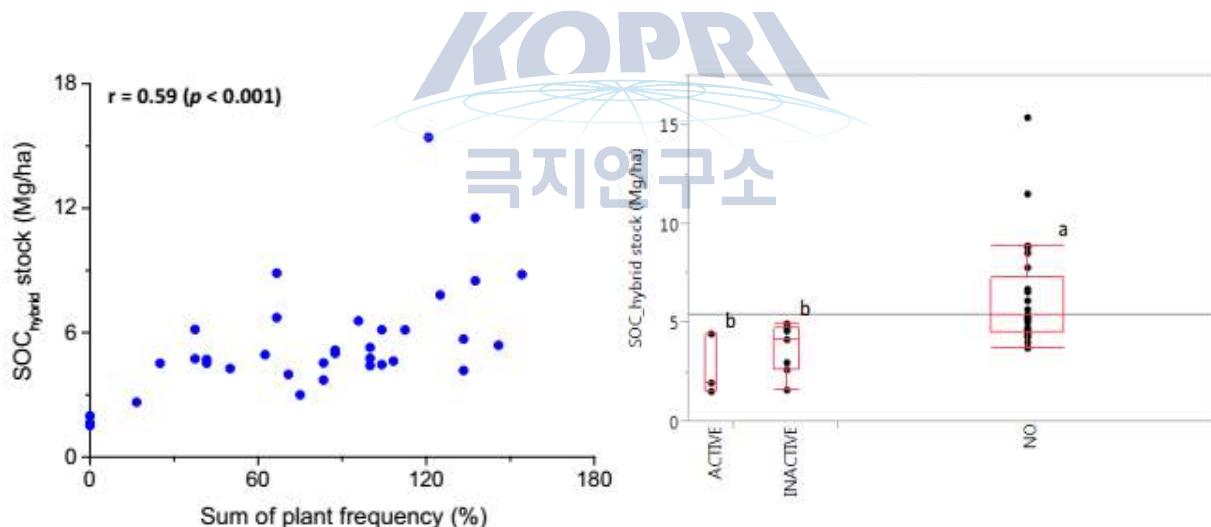


그림 1-21. 관속 식물 빈도의 합과 유기탄소 저장량 사이의 상관관계

그림 1-22. 하천 범람 정도에 따른 유기탄소 저장량

사. 토양 유기탄소 지도 작성

0-5 cm 깊이 토양 유기탄소 농도값과 질소, C/N ratio와 식물 조사 자료를 정성적 데이터로 변환한 후, 대응인자 분석 실시하였다(그림 1-23). 그 결과 토양 유기탄소와 관속식물 빈도가 1 축의 오른쪽 방향으로 증가하는 패턴으로 나타났다(그림 1-24).

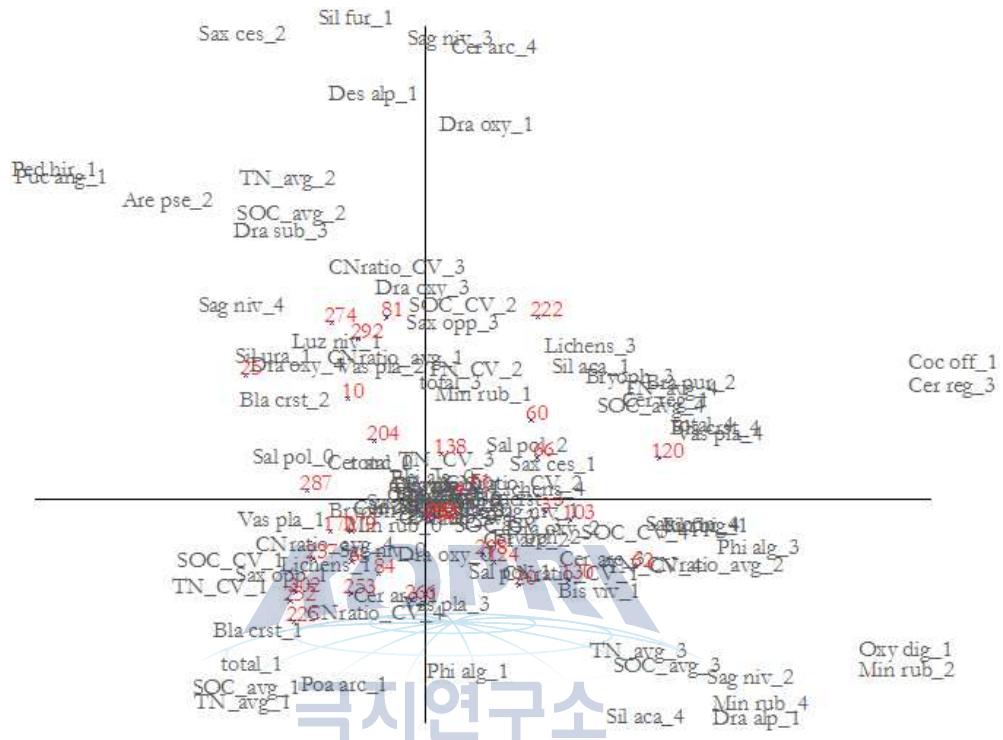


그림 1-23. 대응인자 분석 후, 1축과 2축을 중심으로 변수와 샘플링 지점의 분포

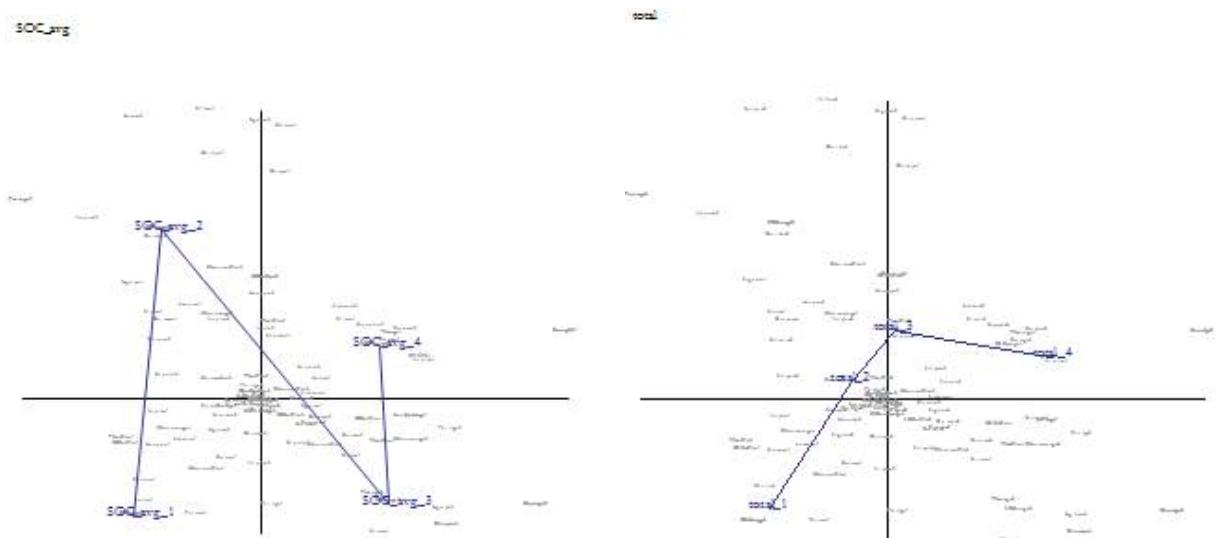


그림 1-24. 대응인자 분석 후, 1축을 중심으로 토양 유기탄소(좌)와 식물 빈도 합(우) 자료의 분포

3축까지의 자료를 이용하여 Ward 방법을 통해 샘플링 지점들의 classification 나눈 결과, 총 6 개의 클래스로 구분되었다. 구분한 각 클래스의 gravity center와 최소 거리를 기준으로 변수들의 class를 선정하였다(그림 1-25).

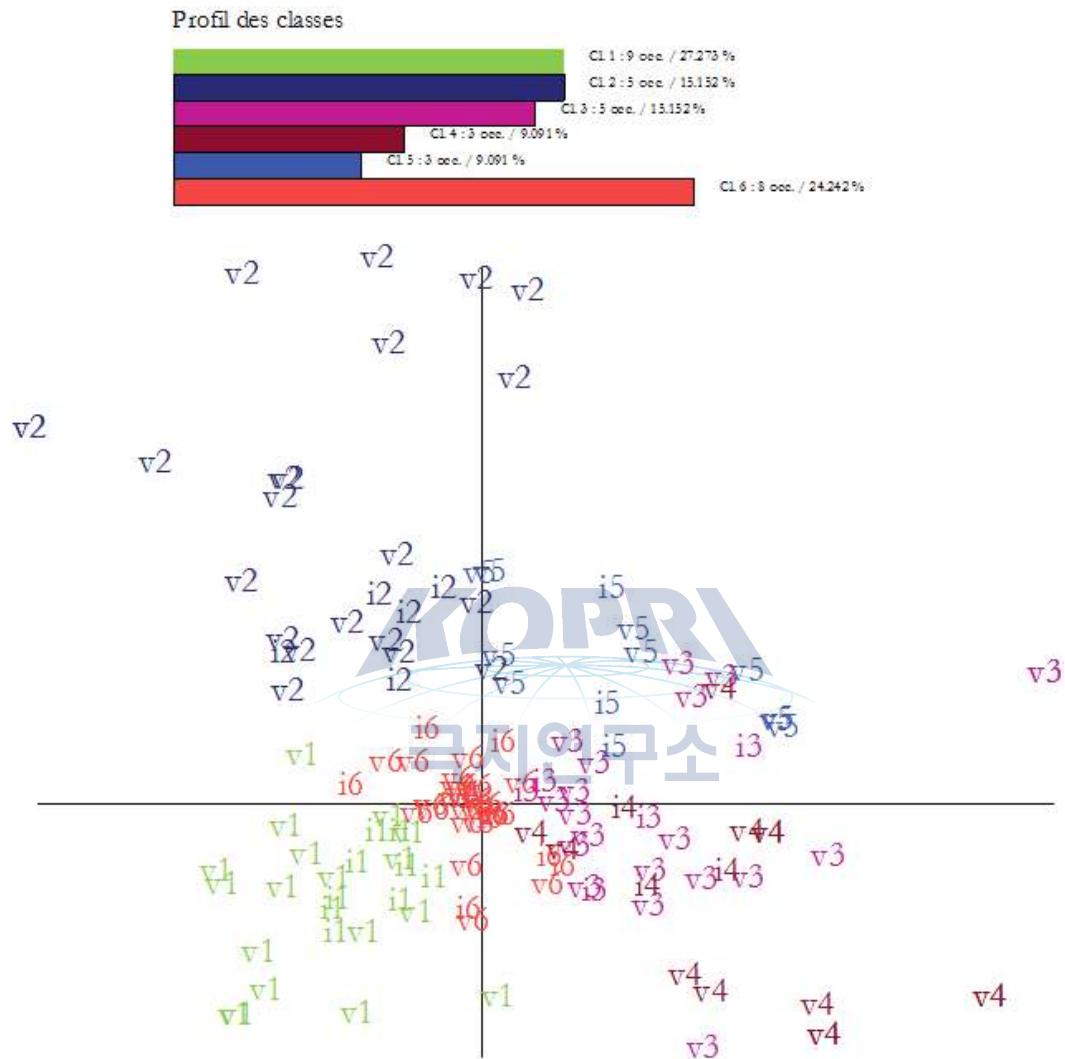


그림 1-25. 분석에 이용된 모든 토양 및 식물 자료 변수들의 factorial space (1, 2축 중 심)에서의 분포

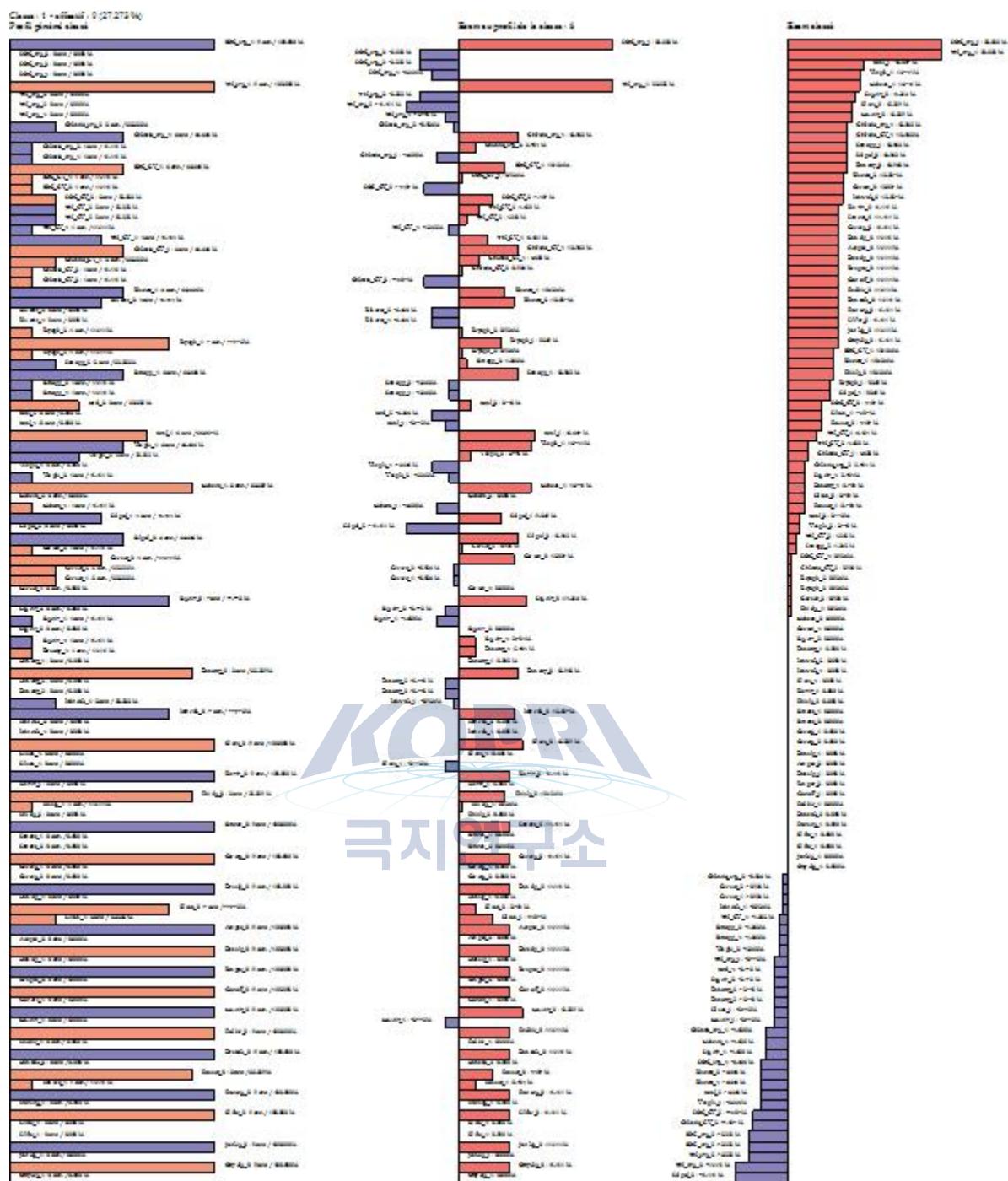


그림 1-26. 각 클래스마다 변수들의 modality 분포에 관한 통계 정보

Pleiade와 DEM으로부터 17개의 환경 데이터를 활용하고 (그림 1-27), Maximum likelihood method를 이용하여 각 픽셀의 클래스를 결정하였다(그림 1-28).

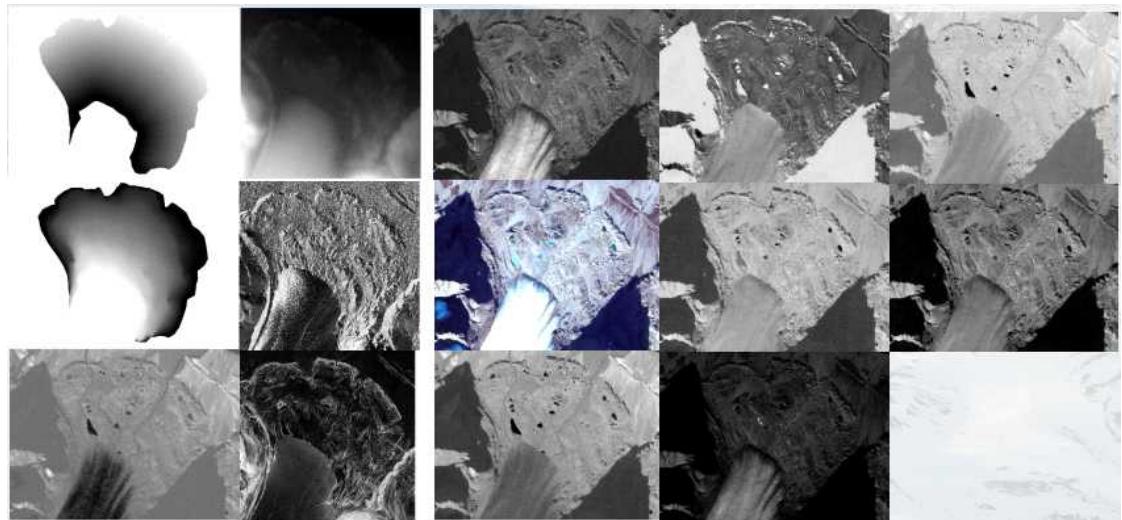


그림 1-27. 픽셀의 클래스 결정에 활용한 환경 데이터

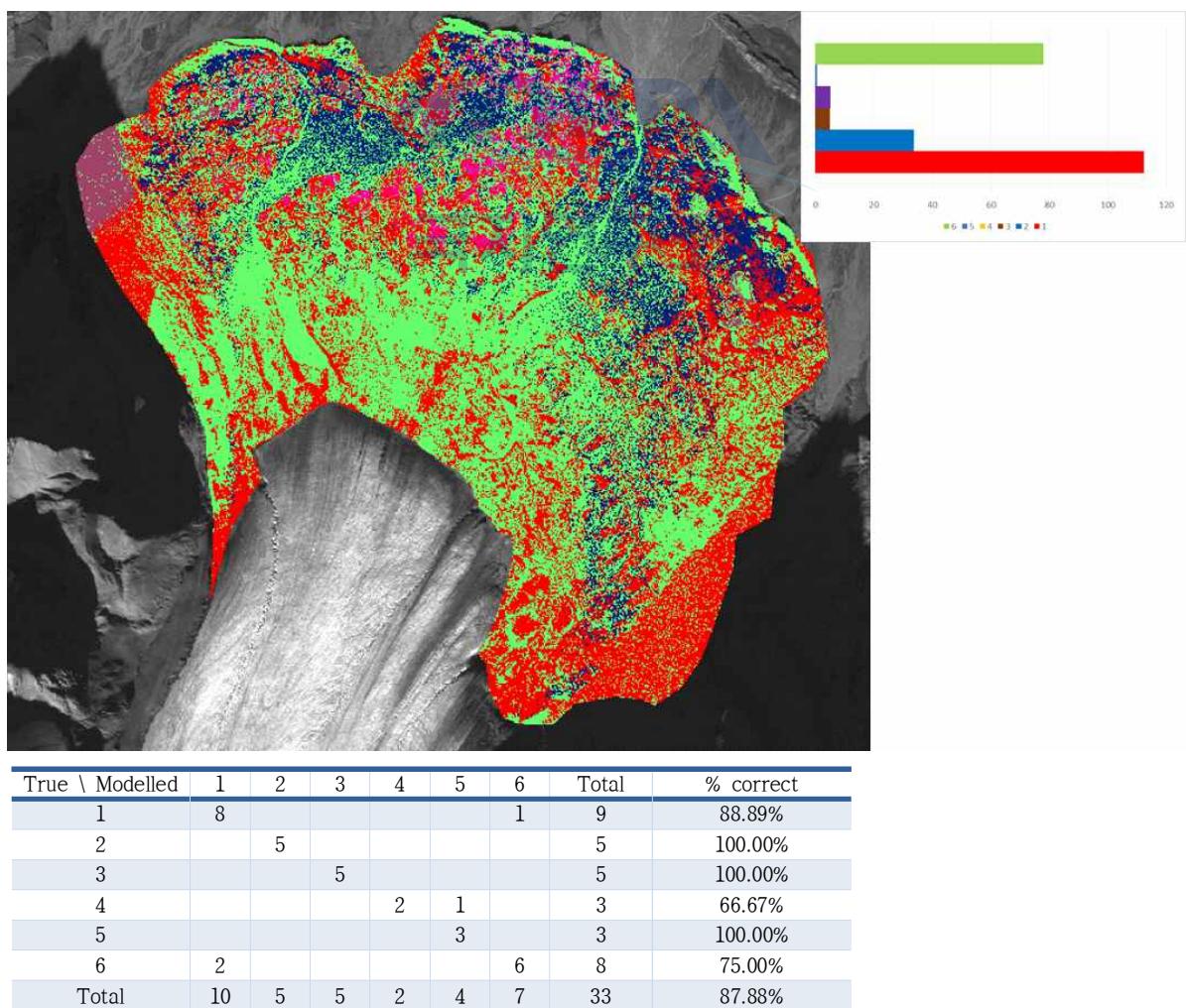


그림 1-28. 환경 자료를 활용한 빙하후퇴지역의 클래스 선정 및 confusion matrix를 통한 정확도 검정

베이지안 모델을 이용하여 각 클래스에서 SOC1 ~ SOC4 분포를 산출 후, 빙하후퇴지역 내에서 0-5 cm깊이의 토양 유기탄소 분포를 모델링 하였다(그림 1-29). 빙하후퇴지역의 유기탄소의 분포는 토양이 오래될수록 증가하지만, 토양의 연대뿐만 아니라 runoff activity와 미세지형 등에 의해서도 영향 받음을 보여주었다.

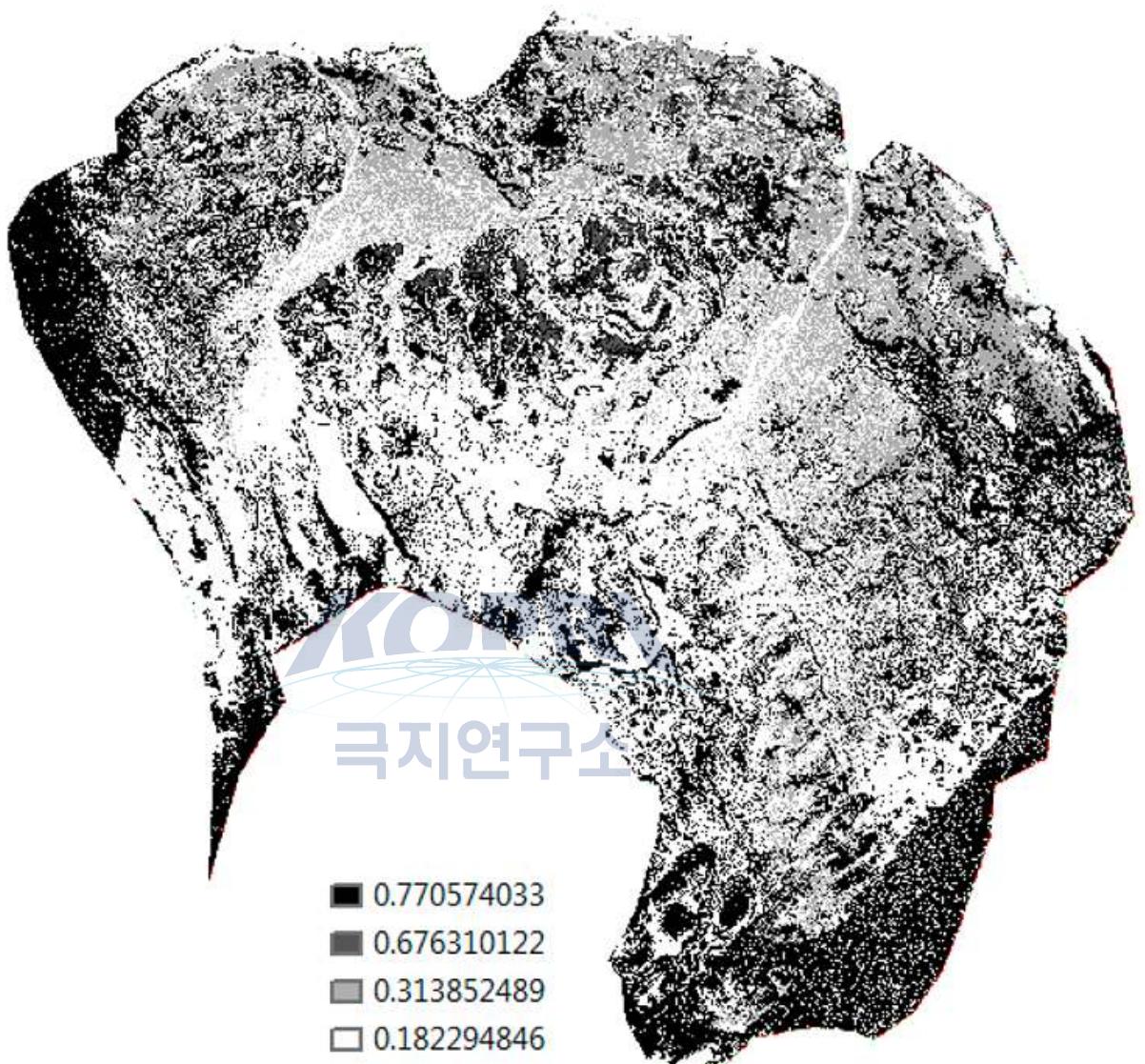


그림 1-29. 빙하후퇴지역의 토양 0-5 cm 깊이에서 유기탄소 분포도

4. 중앙로벤빙하 후퇴지역 미생물 군집 특성 조사

가. 미생물 군집 분석을 위한 중앙로벤빙하 후퇴지역 토양 샘플 선정

3개의 line transect sampling(50m간격)을 통해 총 42개의 표층 토양 시료를 세균 16S amplicon sequencing에 이용하였다. 그리고 토양 특성 분석을 위해 선정한 42개 지점 중 표층(D1, 0~5cm) 시료를 토양 메타지놈 분석에 이용하였다(그림 1-6.)

나. 빙하후퇴 시기에 따른 토양 세균 군집과 다양성 변화 패턴 분석

MiSeq 16S amplicon sequencing을 이용한 토양 세균 군집 결과 총 540,323개의 정제된 염기서열들을 얻었으며, 97% 염기서열 유사도를 적용한 OTU(operational taxonomic unit) 단위에서는 총 14,023 OTUs가 얻어졌다.

샘플 전체적으로 총 34개의 세균 phylum이 확인되었으며, Proteobacteria(31.0%), Acidobacteria(14.2%), Actinobacteria(12.7%)가 가장 우점하는 것으로 나타났다(그림 1-30). 각 phylum들의 상대도수와 빙하후퇴시기간의 상관성을 살펴보았을 때 Acidobacteria의 상대도수는 빙하후퇴시기에 따라 감소하는 패턴을 보였고($P=0.003$), 반대로 Chloroflexi의 경우 증가하는 경향을 보였다($P<0.001$) (그림 1-31).

Acidobacteria의 경우 이들의 상대도수와 토양 pH와의 높은 상관성이 기존에 많이 보고된 바, 빙하후퇴가 진행됨에 따라 감소된 토양 pH가 Acidobacteria의 상대도수 감소의 주 요인일 것으로 판단된다. Chloroflexi의 경우 토양 pH 변화와 상관관계가 크지 않고($r=0.23$, $P>0.05$), 다른 세균 phylum들에 비해 이들의 생리적 특성이 상대적으로 덜 알려진 바 빙하후퇴로 인한 어떤 생태적 변화가 이들의 상대도수 변화에 영향을 준 것인지는 판단하기 어렵다.

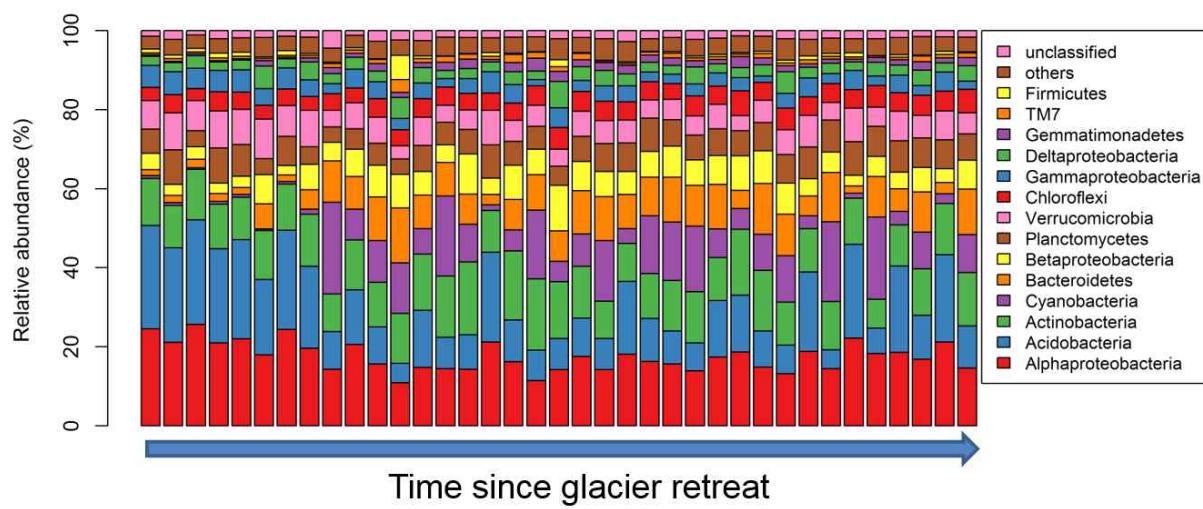


그림 1-30. 빙하후퇴시기에 따른 phylum 레벨에서의 세균 상대도수 변화

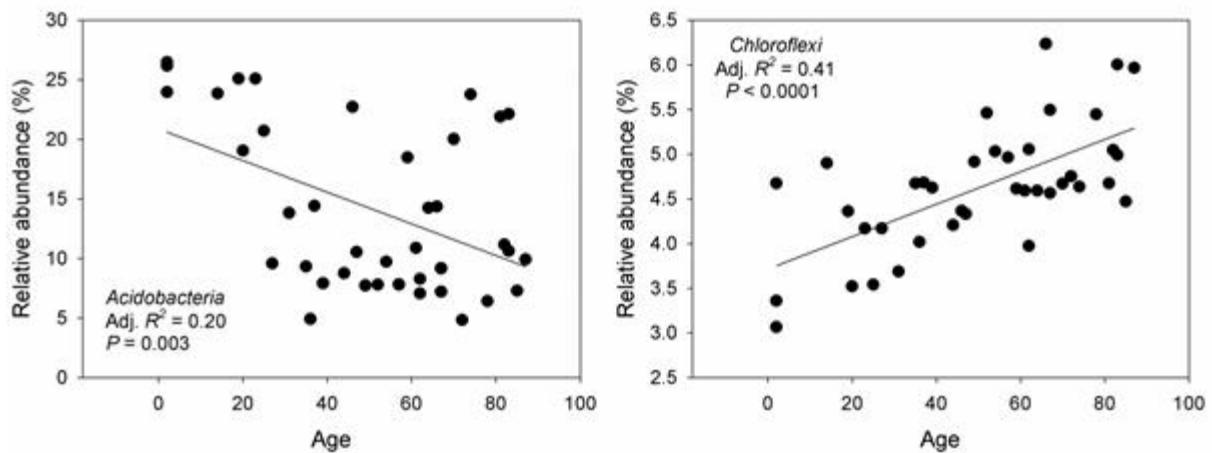


그림 1-31. 빙하후퇴시기에 따른 Acidobacteria와 Chloroflexi의 상대도수 변화

빙하후퇴가 진행되면서 세균 종 다양성은 증가하는 패턴을 보였다. 세균 종 다양성은 빙하후퇴 초기에 급격히 증가하다가 중기를 거치며 완만한 상승곡선을 보였고, 빙하후퇴 후 60-90년에 이르는 후기 시점에는 높은 다양성이 그대로 유지되었다(그림 1-32).

이러한 세균의 종 다양성 변화는 빙하후퇴로 노출된 토양의 pH변화와 큰 연관성이 있는 것으로 판단된다. 빙하후퇴지역 기반암은 석회암 지대로 pH 9에 이르는 알칼리성 토양이며 일반적으로 빙하후퇴지역 토양은 빙하후퇴에 따른 식물 정착, 토양발달이 진행되면서 산성화되는 경향을 보인다. 때문에 세균 종 다양성과 토양 pH 간의 높은 상관성을 생각할 때 세균 종 다양성 증가는 감소된 토양 pH에 기인한 것으로 판단된다.

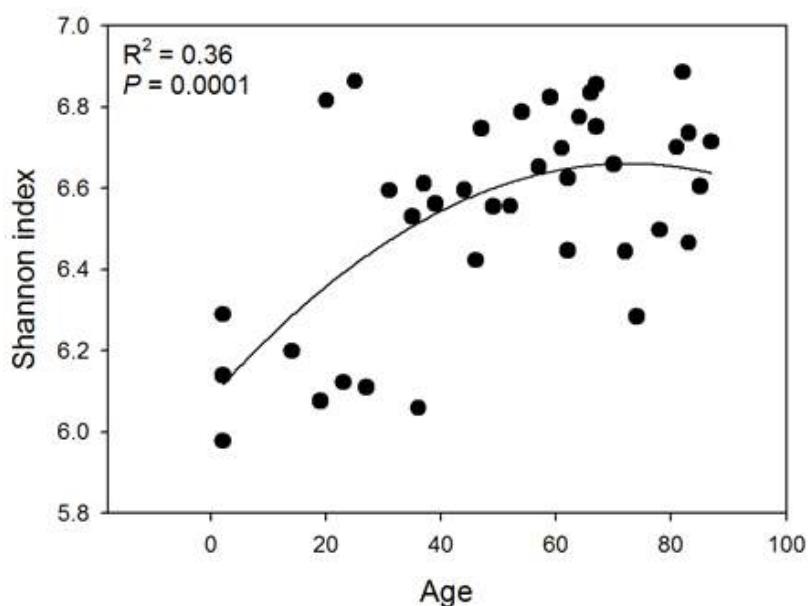


그림 1-32. 빙하후퇴시기에 따른 세균 종 다양성 변화

다. 토양 세균 군집과 환경인자 간의 상관관계 분석

빙하후퇴지역의 토양 세균 군집구조는 대체적으로 빙하후퇴시기에 따라 변화하는 경향을 보였다. 토양 pH는 빙하후퇴시기와 정반대 방향으로 높은 상관관계를 보였고, 토양유기물(TOC) 함량과 전질소(TN)는 양의 방향으로 높은 상관관계를 보였다. 토양 수분함량(soil moisture)은 빙하후퇴시기와 독립적으로 세균 군집구조에 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 1-33.)

빙하후퇴에 따른 토양 pH의 변화가 세균 종 다양성 및 특정 phylum의 상대도수변화에 영향을 미치는 것과 궤를 같이하여 종 수준의 세균 군집구조에도 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 빙하 용융수가 흘러내려 형성된 runoff와 호수들 주위 토양에서 주로 높은 수분함량을 보이는 바 이러한 수분구배가 토양 pH와는 독립적인 방향으로 세균 종 구성에 영향을 준 것으로 판단된다.

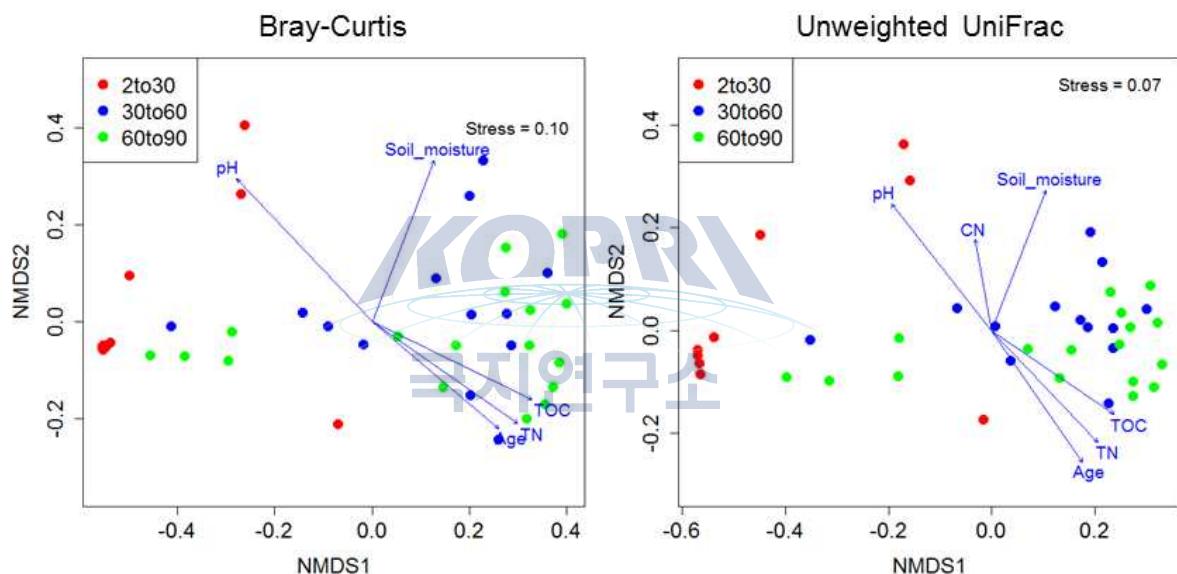


그림 1-33. 토양 세균 군집구조와 환경인자 간의 상관관계

라. 미생물 생물량 정량분석

중앙로렌 빙하 후퇴지역 42개 지점에 대해 qPCR을 이용한 세균, 고세균, 진균 군집에 대한 생물량 분석을 수행한 결과 진균과 세균 군집의 생물량은 사이트 별로 큰 변이를 보이는 반면 고세균 생물량은 변이의 폭이 상대적으로 적게 나타났다(그림 1-34).

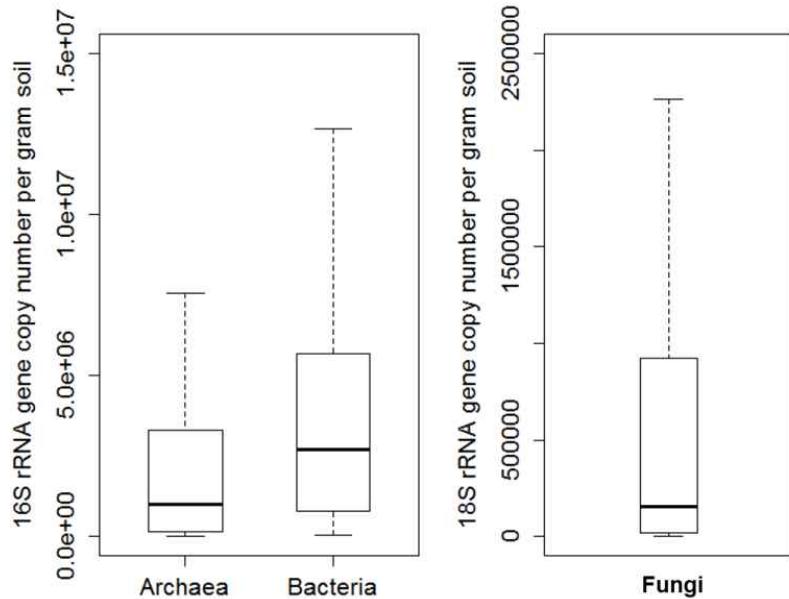


그림 1-34. qPCR을 이용한 미생물 그룹별 생물량 정량결과

마. Metagenome sequencing을 통한 빙하후퇴 시기에 따른 토양 세균 군집 종 구성과 기능 변화 분석

총 40개 샘플들에 대한 토양 메타지놈 분석결과 총 6.9억 개의 정제된 염기서열(0.64 tera byte)을 얻었고, 샘플당 평균 17 ± 4 million reads가 확보되었다(표 1-9).

MG-RAST를 이용한 계통분석 및 기능성 유전자 분석결과 빙하후퇴시기가 미생물 군집의 종 구성과 기능 구성에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 토양 메타지놈 샘플들의 경우 랜덤으로 샘플링 지점이 선정되었으므로, 빙하후퇴시기에 따른 line transect 방법의 결과보다 더 환경요인의 지역적 차이가 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(그림 1-35).

표 1-9. 40개 토양 샘플들을 대상으로 한 shotgun metagenome 염기서열분석 결과

Sample	Total Bases	Read Count
ML-6	1,960,586,548	19,411,748
ML-10	1,836,023,046	18,178,446
ML-20	2,518,226,738	24,932,938
ML-25	884,226,316	8,754,716
ML-25A	1,372,534,450	13,589,450
ML-26	2,490,619,802	24,659,602
ML-30	1,297,421,558	12,845,758
ML-34	1,411,310,168	13,973,368
ML-37	1,377,273,774	13,636,374
ML-37A	1,217,349,768	12,052,968
ML-38	1,678,814,526	16,621,926
ML-39	1,515,622,160	15,006,160
ML-41	1,052,916,314	10,424,914
ML-42	2,180,307,200	21,587,200
ML-43	2,008,855,660	19,889,660
ML-44	1,346,360,906	13,330,306
ML-45	1,930,712,162	19,115,962
ML-46	1,415,264,116	14,012,516
ML-47	1,625,385,930	16,092,930
ML-47A	1,493,648,196	14,788,596
ML-48	1,425,443,300	14,113,300
ML-49	2,140,140,308	21,189,508
ML-50	1,017,636,610	10,075,610
ML-60	1,296,524,880	12,836,880
ML-62	1,979,718,170	19,601,170
ML-66	2,043,895,792	20,236,592
ML-71	1,513,343,802	14,983,602
ML-81	1,560,368,998	15,449,198
ML-84	1,833,638,032	18,154,832
ML-102	1,494,578,002	14,797,802
ML-103	2,298,235,608	22,754,808
ML-120	2,420,261,788	23,962,988
ML-124	2,010,959,288	19,910,488
ML-132	2,353,903,172	23,305,972
ML-138	2,081,397,900	20,607,900
ML-157	2,047,343,528	20,270,728
ML-170	2,363,192,546	23,397,946
ML-182	1,806,725,774	17,888,374
ML-191	1,226,392,904	12,142,504
ML-301	2,456,829,848	24,325,048

* 총 42개 샘플들 중 빙하에 인접한 2개 샘플은 절대적인 생물량 부족으로 인해 염기서열 분석이 이루어지지 않음

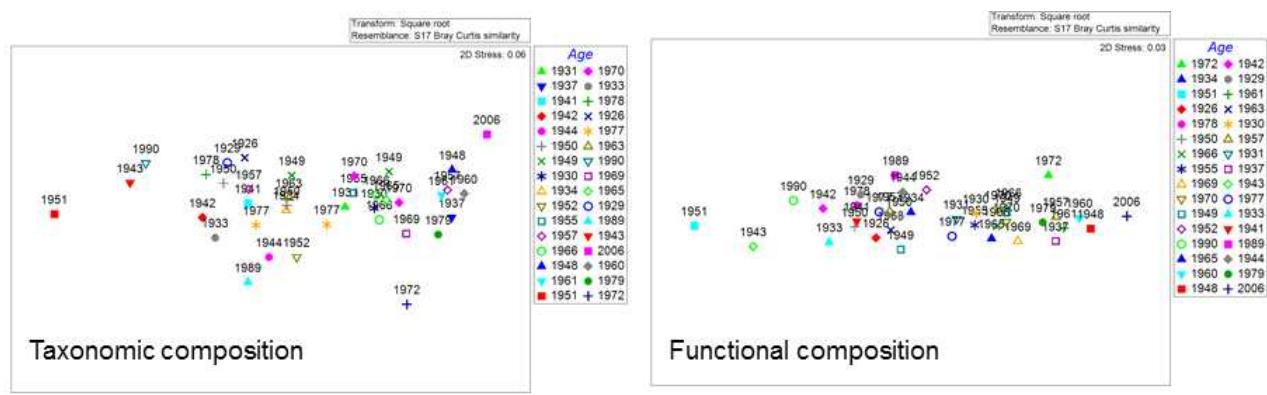


표 1-10. 동로벤 빙하 후퇴지역 샘플링 사이트 및 토양의 물리화학적 특성

Site	Glacier retreat period	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Soil temperature (°C)	Ratio of fine earth <2mm (%)	Gravimetric moisture content (%)	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	TC (mg g ⁻¹)	SOC (mg g ⁻¹)	TN (mg g ⁻¹)	C/N ratio
AL1	2009-2012	78.88614	12.1640	116.7	0.57	50.2 (1.7)	20.6 (1.6)	7.92 (0.06)	287.7 (5.1)	8.3 (0.3)	2.8 (0.5)	0.01 (0.00)	40.3 (10.0)
AL2		78.88809	12.16836	96.5	5.87	52.2 (20.2)	18.6 (1.7)	7.94 (0.09)	217.8 (72.0)	7.2 (2.0)	3.2 (0.8)	0.01 (0.00)	45.0 (7.0)
AL3	1977-1990	78.88866	12.1703	90.2	5.89	49.8 (14.0)	16.3 (1.9)	7.89 (0.02)	243.7 (40.3)	6.2 (0.9)	2.8 (0.3)	0.01 (0.00)	29.0 (1.5)
AL4		78.88968	12.17299	77.3	6.14	41.4 (9.3)	6.0 (0.3)	7.91 (0.06)	185.9 (71.6)	6.1 (1.3)	1.7 (0.5)	0.01 (0.01)	25.6 (4.9)
AL5	1971-1977	78.89113	12.16973	72.0	6.91	64.3 (1.6)	12.1 (1.3)	7.59 (0.07)	324.7 (57.7)	7.7 (1.0)	3.5 (0.6)	0.01 (0.00)	31.3 (5.4)
AL6		78.89143	12.17874	83.5	7.15	55.0 (3.2)	13.0 (1.7)	7.45 (0.05)	314.7 (12.7)	9.6 (1.8)	6.2 (1.4)	0.02 (0.01)	31.5 (3.6)
AL7	1948-1966	78.8940	12.17358	53.0	5.81	50.7 (18.2)	19.4 (2.1)	7.45 (0.05)	287.3 (19.5)	9.1 (0.6)	4.9 (0.9)	0.01 (0.00)	40.8 (7.2)
AL8	1920-1948	78.89712	12.17445	35.5	6.98	56.0 (35.2)	13.3 (1.3)	7.43 (0.09)	258.7 (33.5)	9.3 (0.8)	5.1 (1.4)	0.02 (0.02)	38.6 (10.4)
AL9		78.89854	12.16041	36.2	7.75	93.4 (7.5)	8.3 (8.0)	7.48 (0.12)	193.0 (93.8)	8.4 (0.3)	4.2 (0.2)	0.01 (0.01)	34.5 (10.1)
AL10		78.9002	12.15962	20.8	7.38	70.9 (10.5)	16.7 (1.3)	6.75 (0.22)	234.8 (94.0)	62.3 (23.9)	62.0 (24.1)	0.46 (0.15)	13.2 (1.1)
AL11	Before Little Ice Age	78.90097	12.1616	13.3	7.43	94.9 (7.1)	28.2 (15.2)	7.20 (0.11)	267.0 (76.0)	26.9 (7.6)	23.6 (8.2)	0.24 (0.28)	21.3 (3.7)
AL12		78.90104	12.16734	5.9	7.00	68.4 (29.9)	7.2 (1.8)	7.54 (0.08)	187.9 (63.3)	21.6 (11.3)	18.1 (11.9)	0.11 (0.09)	17.3 (3.0)
AL13		78.90291	12.16155	14.8	7.39	73.2 (26.7)	10.2 (7.8)	7.02 (0.06)	224.3 (50.1)	23.4 (16.2)	22.3 (16.6)	0.22 (0.04)	13.2 (1.6)

* Triplicate measurements are represented as mean (standard deviation)
EC, electrical conductivity; TC, total carbon; SOC, soil organic carbon; TN, total nitrogen

16S amplicon sequencing을 이용한 토양 세균 군집 분석 결과 38개 샘플로부터 총 36,247개의 정제된 염기서열들을 얻었으며, 97% 염기서열 유사도를 적용한 OTU (operational taxonomic unit) 단위에서는 총 9,296 OTUs가 얻어졌다.

샘플 전체적으로 총 34개의 세균 phylum이 확인되었으며, Proteobacteria(41.7%), Acidobacteria(11.8%), Bacteroidetes(8.9%), Actinobacteria(8.0%), Chloroflexi(6.6%)가 가장 우점하는 것으로 나타났다(그림 1-37). 각 phylum들의 상대도수와 빙하후퇴시기 간의 상관성을 살펴보았을 때 Acidobacteria와 Chloroflexi의 상대도수는 증가하는 경향을 보였다(Pearson's $r=0.87$, $P<0.001$; $r=0.53$, $P<0.001$). 반면 Bacteroidetes와 Betaproteobacteria의 상대도수는 빙하후퇴가 진행됨에 따라 감소하는 패턴을 보였다 ($r=-0.64$, $P<0.001$; $r=-0.48$, $P<0.001$) (그림 1-38).

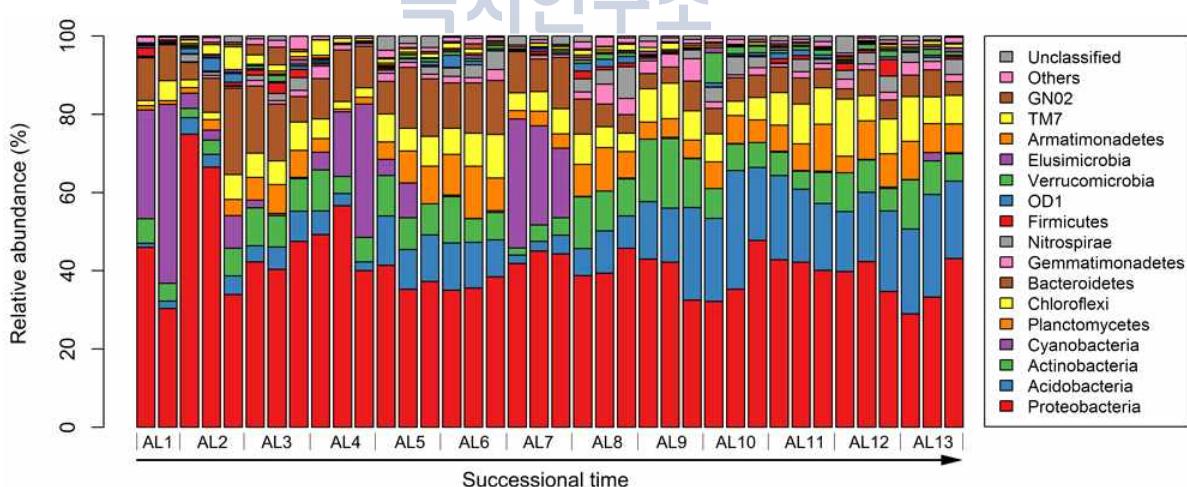


그림 1-37. 빙하후퇴시기에 따른 세균 phylum 분포 변화

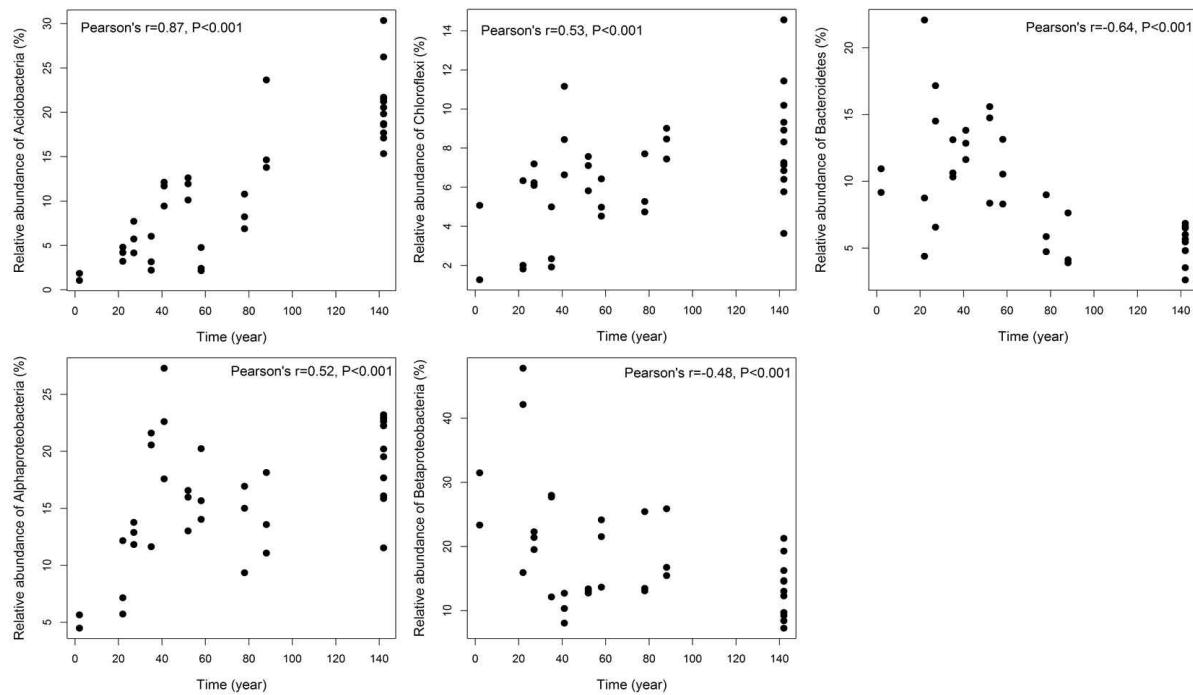


그림 1-38. 빙하후퇴시기에 따른 세균 phylum 별 상대도수 변화

중앙로벤의 경우와 마찬가지로 동로벤에서도 빙하후퇴가 진행되면서 세균 종 다양성은 증가하는 패턴을 보였다. 세균 종 다양성은 빙하후퇴 초기에 급격히 증가하다가 중기를 거치며 완만한 상승곡선을 보였고, 빙하후퇴 후 80년에 이르는 후기 시점에는 높은 다양성이 그대로 유지되었다. 하지만 이와는 반대로 세균 군집의 생존전략과 관련된 생태특성인 rRNA copy number는 빙하후퇴시기에 따라 감소하는 패턴을 보였다(그림 1-39).

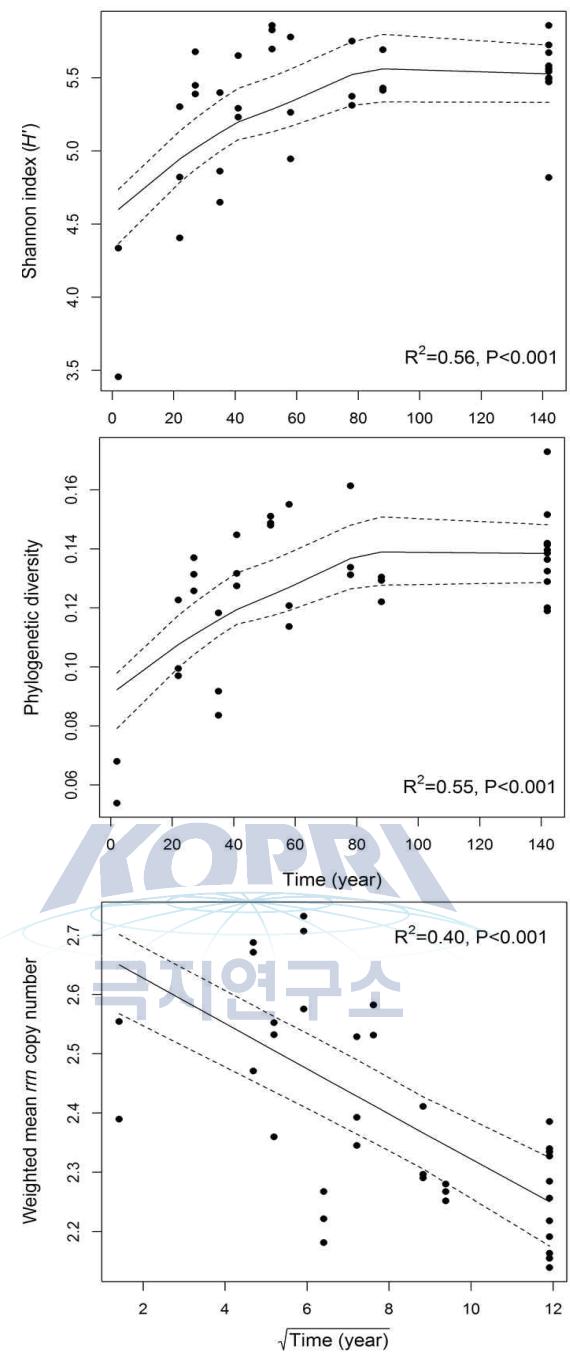


그림 1-39. 빙하후퇴시기에 따른 세균 종 다양성 및 rRNA copy number 변화

빙하후퇴지역의 토양 물리화학적 특성과 토양 세균 군집구조는 대체적으로 빙하후퇴시기에 따라 변화하는 경향을 보인다. 세균 군집의 경우 토양 특성과는 달리 토양 pH와 표면온도가 빙하후퇴시기와 다소 독립적으로 세균 군집구조에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 1-40).

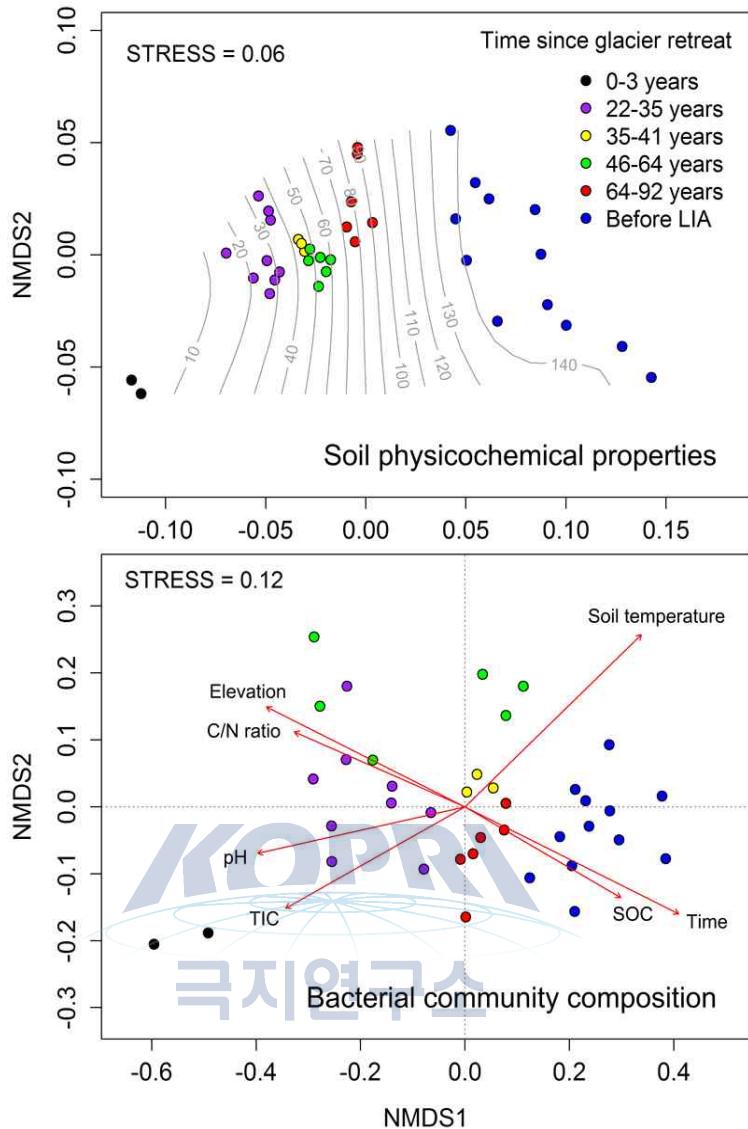


그림 1-40. 토양 특성 유사도와 세균 군집 유사도에 따른 샘플 간 클러스터링 패턴

5. 암석 미생물 연구

가. 2014년 북극 다산과학기지 주변 암석시료 확보

다산기지를 포함한 스피츠베르겐 섬 6개 지점에서 암석 시료를 확보하였다(그림1-41).



그림 1-41. ① Sverrefjellet ② Halvdanpiggen ③ De geerbukta ④ 다산과학기지
⑤ Kapp starostin ⑥ Kapp gnaloden hornsund

확보된 암석시료는 다음과 같은 전처리과정을 거친다(그림1-42).

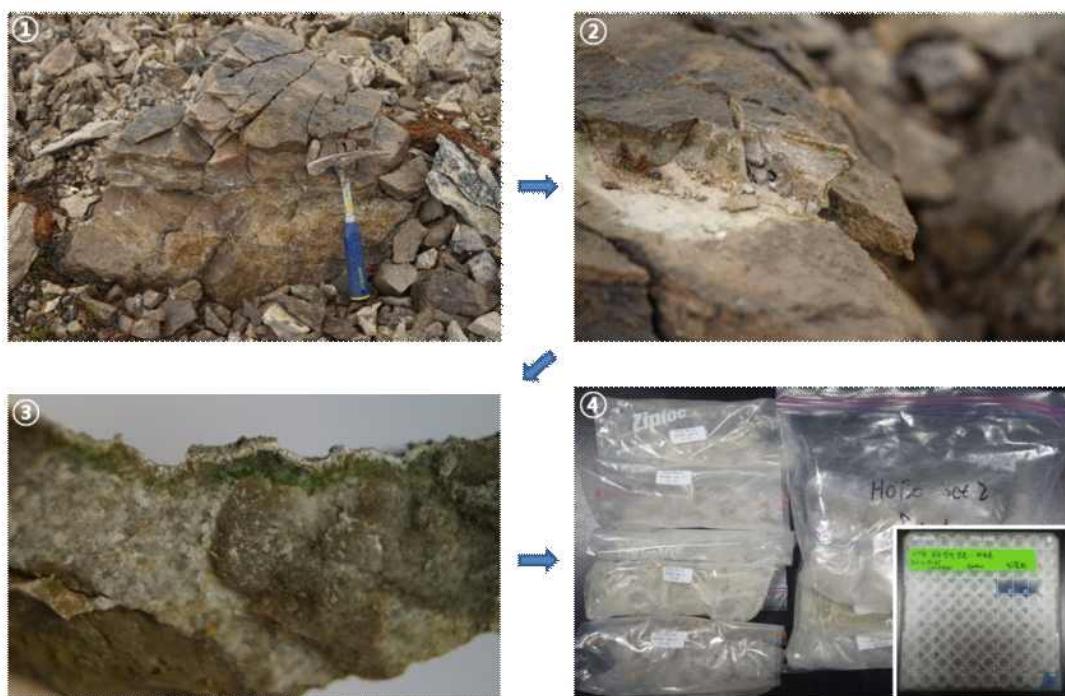


그림 1-42. ① 암석 선정 ② 암석시료 채취 ③ 암석표면 및 내부 사진 촬영 ④ 암석미생
물 DNA용 시료와 배양용 시료 구분하여 처리

6개의 장소에서 7종으로 총 35개의 암석시료를 확보하였다(표1-11).

표 1-11. 2014년 암석시료 목록

No.	sample	Locality	GPS	Lithology
1	L-1	Spitsbergen-Sverrefjellt (volcanic)	N79°26.225' E013°20.390 고도:77m	mentle xenolith
2	L-2	Spitsbergen-Sverrefjellt (volcanic)	N79°26.225' E013°20.390 고도:77m	dolomite
3	L-3	Spitsbergen-Sverrefjellt (volcanic)	N79°26.177' E013°20.234 고도:96m	mentle xenolith
4	L-4	Spitsbergen-Sverrefjellt (volcanic)	N79°26.170' E013°20.265 고도:100m	dolomite
5	L-5	Spitsbergen-Sverrefjellt (volcanic)	N79°26.261' E013°20.512' 고도:66m	mentle xenolith
6	L-6	Spitsbergen-Sverrefjellt (volcanic)	N79°26.261' E013°20.512' 고도:66m	dolomite
7	L-7	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.302' E013°26.386 고도:27m	travertine
8	L-8	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.305' E013°26.388 고도:35m	travertine
9	L-9	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.308' E013°26.431 고도:34m	travertine
10	L-10	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.309' E013°26.469 고도:32m	travertine
11	L-11	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.308' E013°26.513 고도:28m	travertine
12	L-12	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.314' E013°26.569 고도:23m	travertine
13	L-13	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.316' E013°26.615 고도:20m	travertine
14	L-14	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.316' E013°26.622 고도:19m	travertine
15	L-15	Spitsbergen-Troll spring	N79°23.320' E013°26.595 고도:20m	travertine
16	L-16	Spitsbergen-De geerbukta	N79°35.302' E017°44.483 고도:20m	limestone
17	L-17	Spitsbergen-De geerbukta	N79°35.296' E017°44.596 고도:12m	limestone

18	L-18	Spitsbergen-De geerbukta	N79°35.213' E017°44.669 고도:14m	limestone
19	L-19	Spitsbergen-De geerbukta	N79°35.041' E017°44.552 고도:11m	limestone
20	L-20	Spitsbergen-Kapp gnaloden hornsund	N77°01.254' E015°53.659 고도:10m	limestone
21	L-21	Spitsbergen-Kapp gnaloden hornsund	N77°01.341' E015°52.903 고도:227m	limestone
22	L-22	Spitsbergen-Halvdanpiggen woodfjord	N78°05.257' E013°48.178 고도:778m	sandstone
23	L-23	Spitsbergen-Halvdanpiggen woodfjord	N79°23.297' E013°37.907 고도:771m	basalt
24	L-24	Spitsbergen-Halvdanpiggen woodfjord	N79°23.297' E013°37.907 고도:771m	basalt with MX
25	L-25	Spitsbergen-Halvdanpiggen woodfjord	N79°23.297' E013°37.907 고도:771m	basalt with MX
26	DS-1	Dasan Station-southeast	N78°55.093' E011°56.966' 고도:0m	sandstone
27	DS-2	Dasan Station-southeast	N78°54.969' E011°58.458' 고도:10m	chert
28	DS-3	Dasan Station-Stupbekken	N78°57.312' E011°41.201' 고도:63m	limestone
29	DS-4	Dasan Station-Stupbekken	N78°57.251' E011°41.168' 고도:123m	dolomite
30	DS-5	Dasan Station-Stupbekken	N78°57.232' E011°41.084' 고도:128m	dolomite
31	DS-6	Dasan Station-Stupbekken	N78°57.146' E011°41.124' 고도:180m	chert
32	DS-7	Dasan Station-Strypbekken	N78°56.320' E011°41.935' 고도:227m	dolomite
33	DS-8	Dasan Station-Strypbekken	N78°56.254' E011°41.838' 고도:235m	limestone
34	DS-9	Dasan Station-Scheteligfjellet	N78°57.192' E011°41.090' 고도:163m	limestone
35	DS-10	Dasan Station-Scheteligfjellet	N78°57.166' E011°41.354' 고도:168m	chert

나. 2014년 암석 시료 확보 지역에 온도 측정 장치 설치

암석 미생물의 서식 환경에 대한 이해가 필수적으로 필요하기 때문에 대기온도와 암석 내부 온도차를 측정하기 위한 센서 장비(iButton)를 설치한 뒤(그림 1-43), 2014년 8월부터 2015년 8월 까지 총 1년간 모니터링을 실시하였다.



그림 1-43. ① 센서설치 장소 설정 ② 대기온도 측정용 iButton 설치 ③ 암석 내부 온도 측정용 iButton 설치 ④ 설치 완료된 모습

다. 2014년 암석시료 미생물 군집 분석

암석 표면과 내부에 존재하는 미생물을 SEM(scanning electron microscope)장비로 촬영하였다 (그림 1-44).

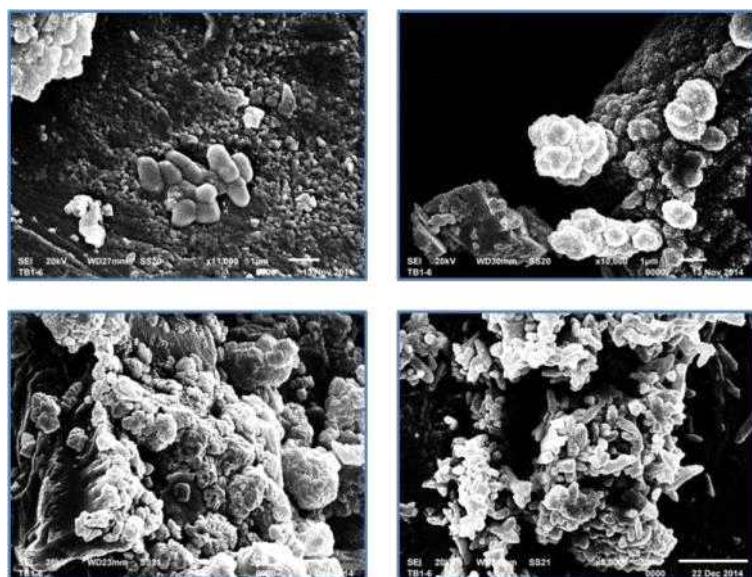


그림 1-44. 암석에 서식하는 미생물의 전자현미경 사진

확보한 시료 중 대표적인 5군데 지역을 선정 후, 암석에 존재하는 박테리아 군집 다양성을 분석하였다(그림 1-45). 이 중에서 다산과학기지가 있는 브뢰거 반도의 암석시료가 가장 높은 미생물 다양성 보였다.

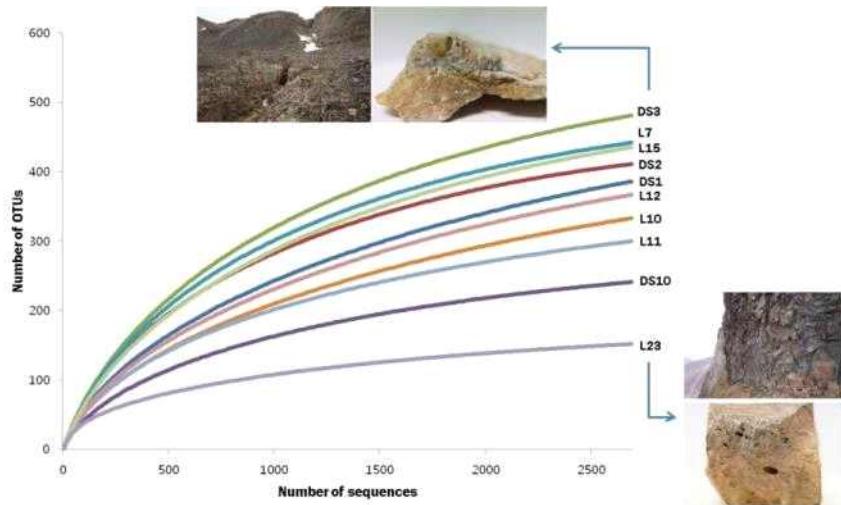


그림 1-45. 암석 내 박테리아 군집 다양성 및 대표지역 사진

암석 박테리아 군집구조를 분석한 결과(그림 1-46), 대부분의 암석 시료에서 방선균 (*Actinobacteria*), 프로테오박테리아(*Proteobacteria*), 남세균(*Cyanobacteria*) 등이 우점으로 나타났으며, troll spring 지역의 암석에서는 스트레스 내성균에 속하는 *Deinococcus-thermus*가 나타났다.

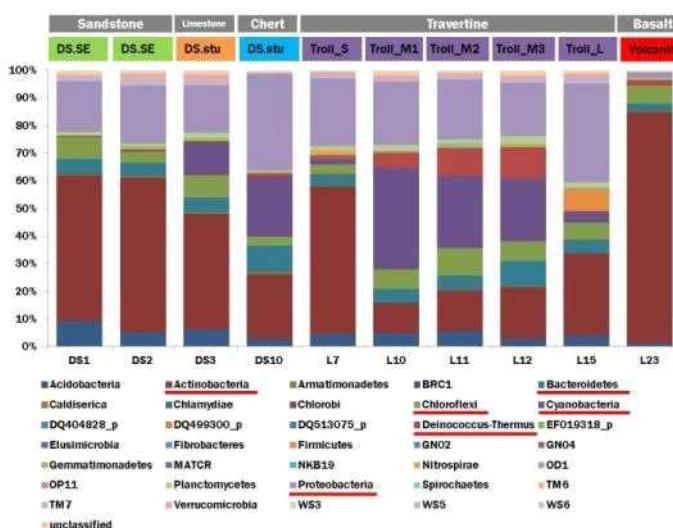


그림 1-46. 암석 시료별 문(phylum) 수준에서의 박테리아 군집구조

두 분석의 결과 암석 채취 지역별, 암석 종류별 다양한 미생물 군집 구조 보였다.

OTU 데이터를 이용한 박테리아 PCO(Principal coordinates) 분석한 결과(그림 1-47), 서식 환경이 유사한 암석 시료끼리 그룹을 이루는 결과를 보였다.

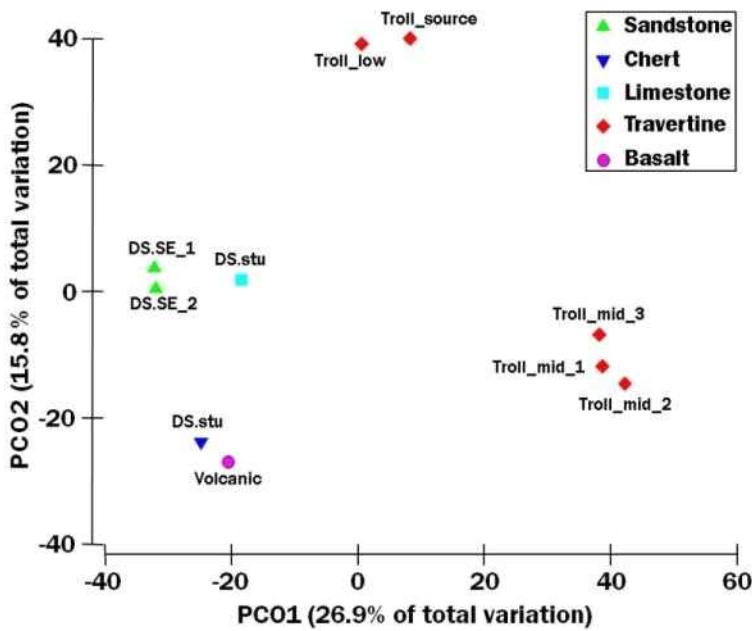


그림 1-47. 암석 박테리아 OTU 데이터 기반 PCO 분석

암석 내 균류(Fungi) 군집 다양성 분석하였으며(그림 1-48), 이 중에서 troll spring 지역 암석 시료에서 가장 높은 미생물 다양성을 나타냈다.

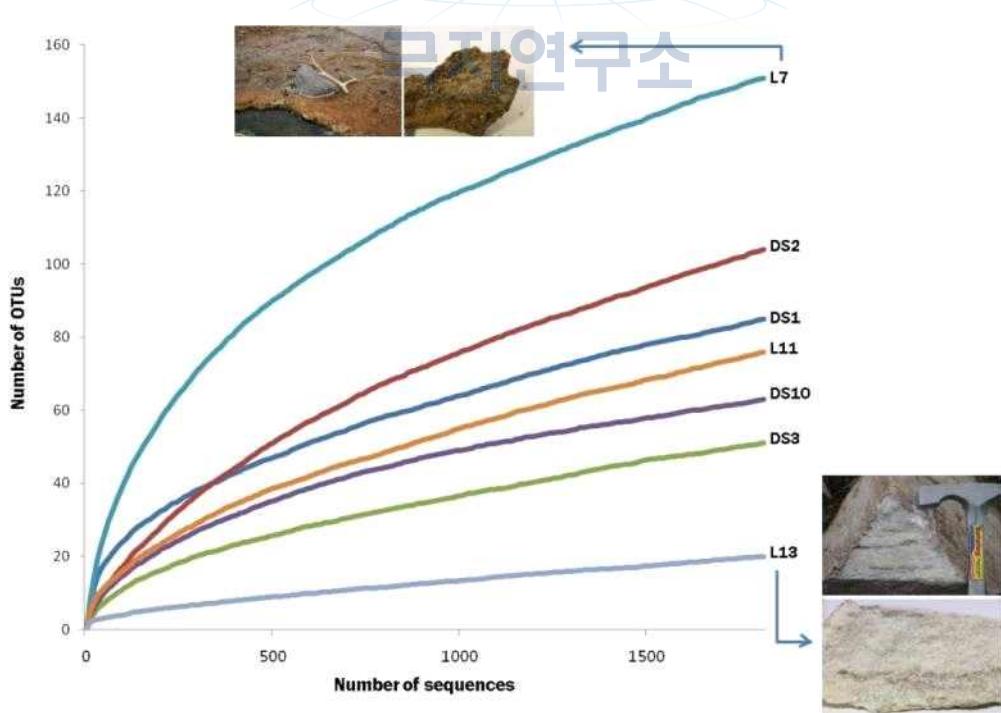


그림 1-48. 암석 곰팡이 군집 다양성 및 대표지역 사진

군집구조 분석 결과(그림 1-49), 암석에 서식하는 우점 균류는 지의류를 구성하는 자낭균(*Ascomycota*)으로 나타났다.

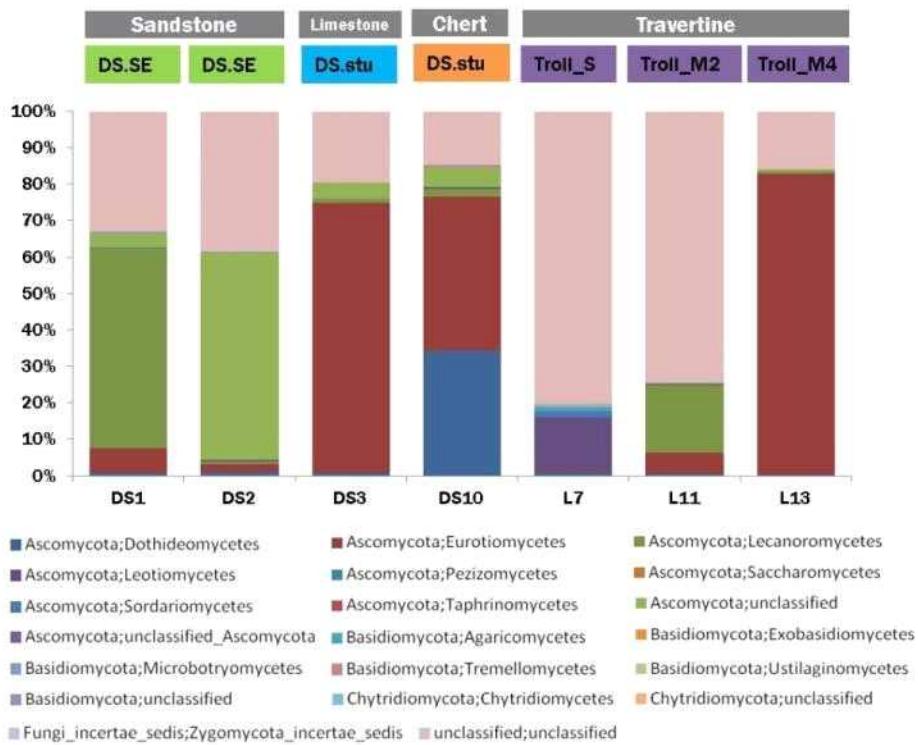


그림 1-49. 암석 시료별 강(class) 수준에서의 균류 군집구조

OTU 데이터를 이용한 곰팡이 PCO(Principal coordinates) 분석한 결과(그림 1-50), 서식 환경이 유사한 암석 시료끼리 그룹을 이루는 결과를 보였다.

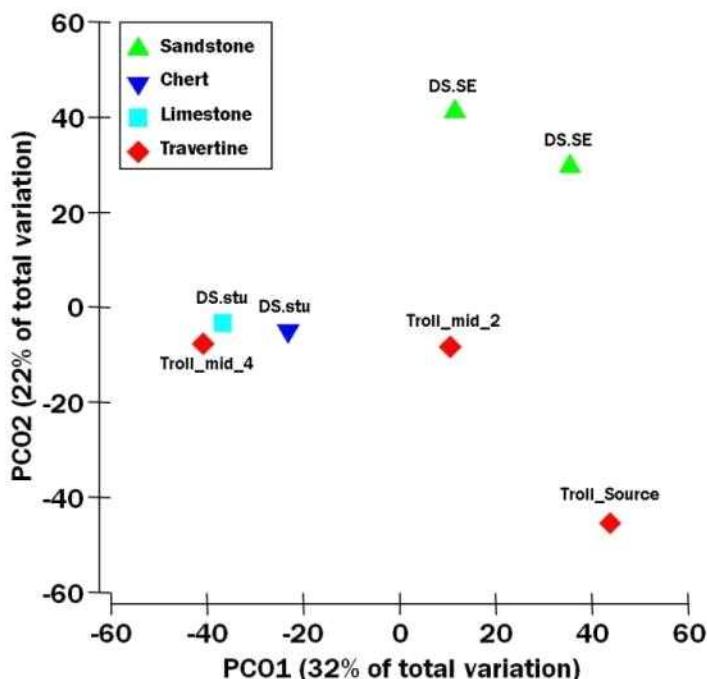


그림 1-50. 암석 균류 OTU 데이터 기반 PCO 분석

라. 2015년 북극 다산과학기지 주변 암석시료 확보
다산과학기지가 있는 브뢰거 반도 3개 지역에서 시료를 확보하였다(그림 1-51).



그림 1-51. ① Stupbekken 하부 ② Stupbekken 상부 ③ scheteligfjellet ④ 다산과학기지

마. 2014년 설치된 온도 데이터 확보용 iButton 수거 및 데이터 분석
1년간(2014년 8월~ 2015년 8월) 측정한 온도를 노르웨이 기상 연구소 실측 온도와 비교분석하였다.(그림 1-52)

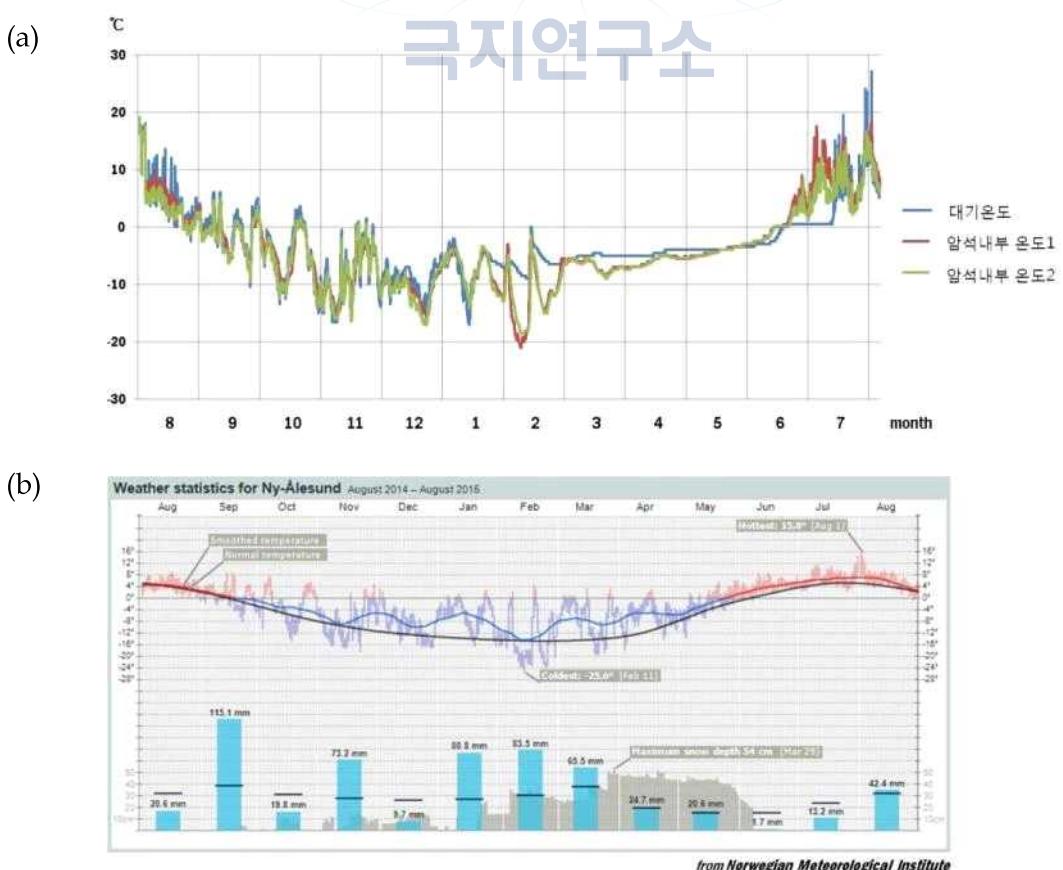


그림 1-52. (a) iButton에 기록된 온도 (b) 2014-2015년 니알슨 연중온도 및 강설 데이터

3개의 장소에서 4종, 총 33개의 암석시료를 확보 후 전처리하였다(표 1-12).

표 1-12. 2015년 암석시료 목록

sample	Locality	Lithology
D-1	stupbekken 하부	N78°57.299' E011°41.286' 고도73m
D-2		N78°57.273' E011°41.308' 고도83m
D-3		N78°57.274' E011°41.286' 고도83m
D-4		N78°57.276' E011°41.258' 고도86m
D-5		N78°57.278' E011°41.232' 고도88m
D-6		N78°57.275' E011°41.361' 고도30m
D-7		N78°57.278' E011°41.326' 고도80m
D-8		N78°57.282' E011°41.269' 고도82m
D-9		N78°57.289' E011°41.239' 고도83m
D-10		N78°57.289' E011°41.239' 고도83m
D-11		N78°57.316' E011°41.272' 고도71m
D-12		N78°57.318' E011°41.310' 고도68m
D-13		N78°57.317' E011°41.309' 고도72m
D-14	stupbekken 상부	N78°57.141' E011°41.137' 고도176m
D-15		N78°57.133' E011°41.153' 고도179m
D-16		N78°57.133' E011°41.127' 고도179m
D-17		N78°57.136' E011°41.099' 고도179m
D-18		N78°57.141' E011°41.060' 고도178m
D-19		N78°57.147' E011°41.069' 고도175m
D-20		N78°57.144' E011°41.117' 고도176m
D-21		N78°57.138' E011°41.160' 고도176m
D-22		N78°57.136' E011°41.186' 고도177m
D-23		N78°57.134' E011°41.218' 고도178m
D-24	scheteligfjellet	N78°55.683' E011°46.366' 고도99m
D-25		N78°55.682' E011°46.317' 고도105m
D-26		N78°55.681' E011°46.303' 고도106m
D-27		N78°55.679' E011°46.307' 고도106m
D-28		N78°55.658' E011°46.285' 고도103m
D-29		N78°55.675' E011°46.353' 고도100m
D-30		N78°55.692' E011°46.341' 고도102m
D-31		N78°55.701' E011°46.316' 고도104m
D-32		N78°55.691' E011°46.415' 고도95m
D-33		N78°55.677' E011°46.409' 고도93m

눈 때문에 센서가 파묻혀 정상적인 온도 측정이 불가능한 적설기간을 제외한 온도 측정 데이터에 대하여 분석을 진행하였다(그림 1-53a).

분석 결과 신뢰기간에서 대기 온도 보다 암석내부의 온도가 높게 나타났으며(그림 1-53b), 이는 대기온도에 비해 암석 내부 온도변화는 심하지 않는다는 것을 나타낸다.(그림 1-53c).

이 결과에서 북극과 같은 극한의 지역에서 암석 내부가 미생물이 서식하기에 상대적으로 적합한 곳임을 알 수 있었다.

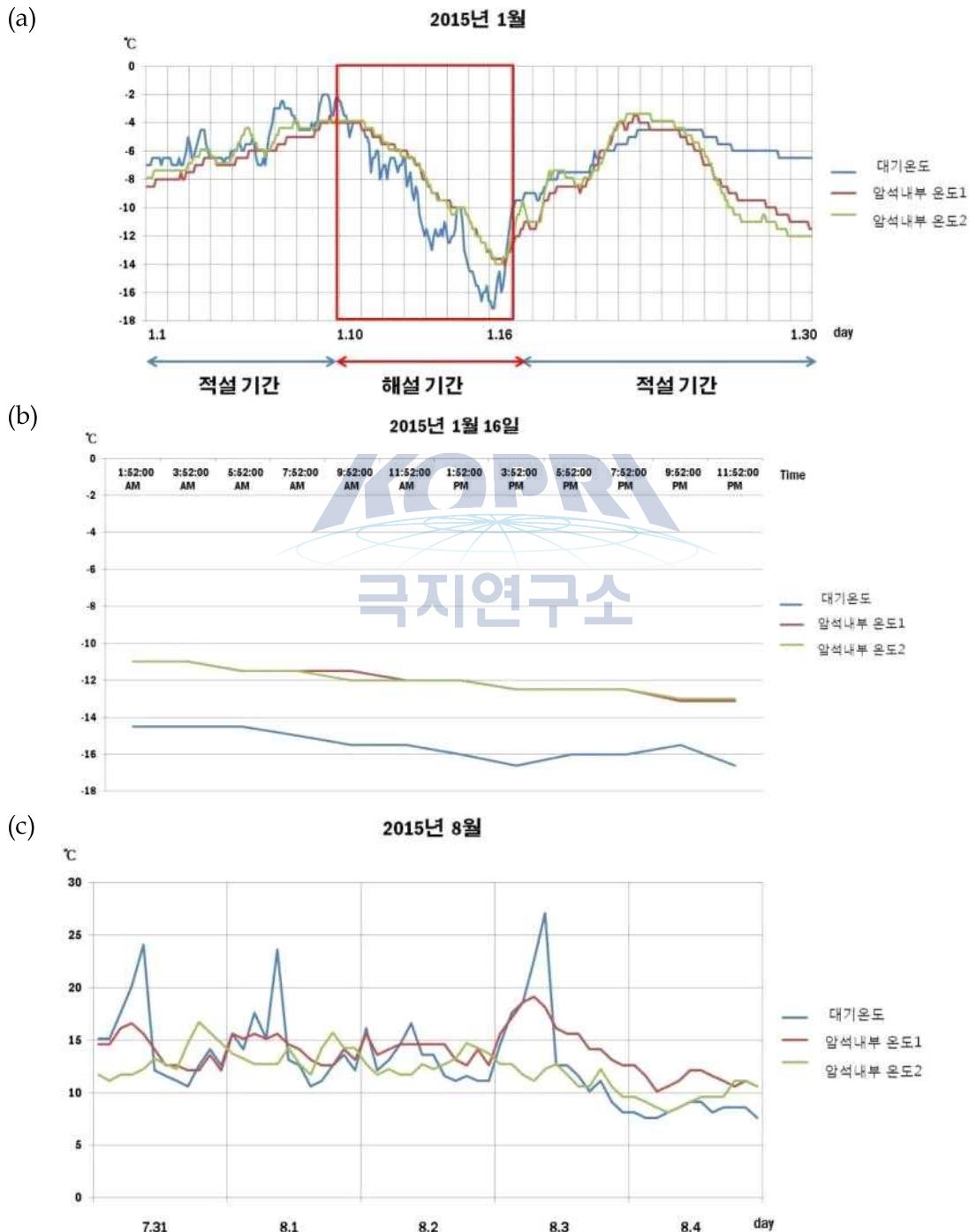


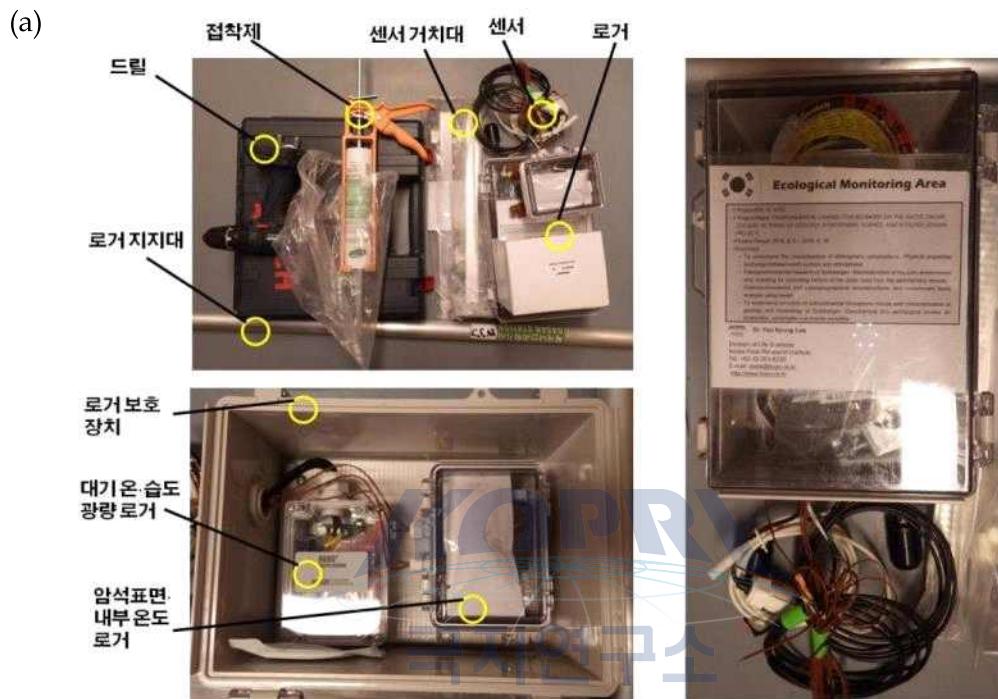
그림 1-53. (a) 온도가 가장 낮은 1월의 온도 그래프 (b) 일일 온도 그래프

(c) 온도가 가장 높은 8월의 온도 변화 그래프

바. 환경 데이터 수집용 HOBO logger 설치

iButton에 비해 오차가 적은 고감도 센서를 사용함으로 대기온도, 상대습도, 광량, 암석온도 등 같은 미세 환경의 데이터 수집을 가능하게 하였다(그림 1-54a).

장비는 3개 지점을 선정하여 3개 set로 설치하였으며(그림 1-54b), logging 옵션 설정 및 센서 이상 유무 체크함으로(그림 1-54c), 2016년 양질의 환경 데이터 수집을 기대하게 하였다.



(c)



그림 1-54. (a) HOBO logger set (b) HOBO logger 설치 지역 (c) 설치된 HOBO 장비

사. 암석 미생물 연구 적합 지역 탐색

다산과학기지를 기반한 지속적인 연구를 위해 암석 미생물 연구에 적합한 지역을 탐색하였다 (그림 1-55).



그림 1-55. 브뢰거 반도 내 연구적합 지역 탐색

아. 2016년 북극 다산과학기지 주변 암석시료 확보

2015년과 차별화된 시료확보를 위해 브뢰거 반도 지역의 서로 다른 환경의 연구지역 3군데를 선정하고 암석시료를 확보한 뒤(그림 1-56), 총 14개의 시료를 전처리 하였다(표 1-13)

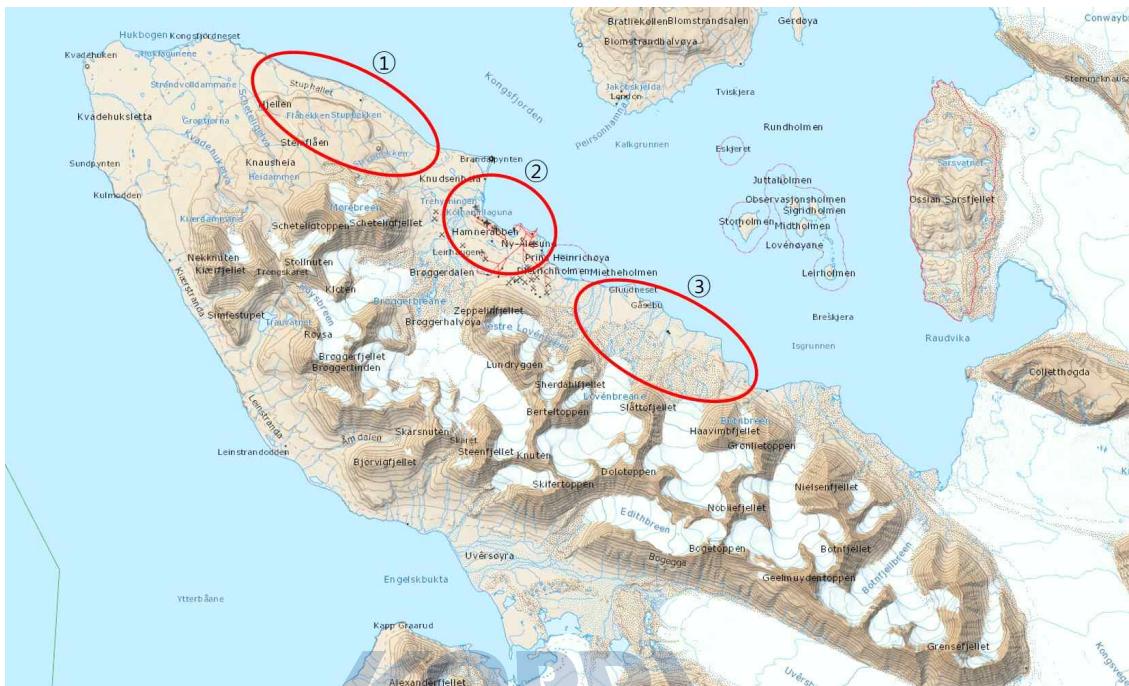


그림 1-56. ① 다산과학기지 주변 ② Strypbekken, Stupbekken, Scheteligfjellet 주변
③ Midtre-Lovénbreen 빙하 주변

극지연구소

표 1-13. 2016년 암석시료 목록

sample	Locality		Lithology
1	Stupbukken	N 78°57.141' E 011°41.137' 고도176m	Limestone
2	Scheteligfjellet	N 78°55.932' E 011°46.270' 고도 81m	Limestone
3	Stuphallet	N 78°57.297' E 011°35.829' 고도 183m	Limestone
4	Stupbukken-Stuphallet	N 78°56.908' E 011°38.486' 고도 210m	Sandstone
5	Scheteligfjellet	N 78°55.866' E 011°46.407' 고도 82m	Limestone
6		N 78°55.868' E 011°46.432' 고도 80m	Limestone
7		N 78°55.944' E 011°46.193' 고도 84m	Limestone
8		N 78°56.011' E 011°45.901' 고도 94m	Sandstone
9		N 78°55.953' E 011°46.071' 고도 90m	Sandstone
10		N 78°55.922' E 011°46.292' 고도 85m	Sandstone
11	Midtre-Lovénbreen	N 78°54.074' E 012°05.671' 고도 31m	Limestone
12		N 78°53.807' E 012°05.368' 고도 51m	Limestone
13		N 78°53.796' E 012°05.465' 고도 51m	Limestone
14		N 78°53.765' E 012°05.448' 고도 54m	Limestone

자. 환경 데이터 수집용 HOBO logger 수거 및 데이터 획득

2015년 8월~2016년 8월까지 1년간 연구지역의 대기온도, 대기습도, 광량, 암석표면 및 내부 온도 데이터를 획득하였다(그림 1-57).

해당지역의 연간 최저 대기 온도는 22.9도, 최고 대기 온도는 18.6도, 최대 상대습도는 100%, 최저 상대습도는 45.2%, 최고 PAR은 2,553uE, 최저 PAR은 1.2uE, 최고 solar radiation은 1,053W/m², 최저 solar radiation은 0.6W/m² 였다.

수집된 환경 데이터를 바탕으로 암석미생물 군집에 어떤 환경요소가 영향을 미치는지 분석 할 예정이다.

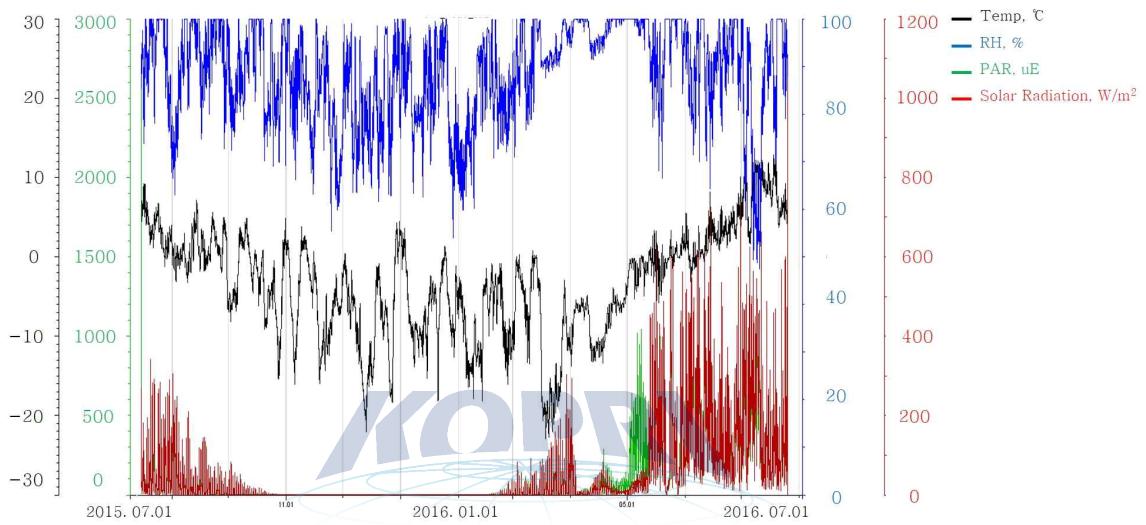


그림 1-57. Stupbekken 지역에서 1년간 기록된 환경 데이터 수치

자. 암석과 암석 미생물 군집 구조의 연관성

2014년에 획득한 암석시료의 성분을 X-ray fluorescence spectrometry 장비를 이용해 분석하였으며, 통계적 방법인 Mantel test를 이용해 암석 성분이 암석에 존재하는 미생물 군집의 구조에 영향을 미치는지 분석하였다(표 1-14).

박테리아 군집에서는 Si, Al, Fe, Na, Mg, P, K, Ca, Ti 와 같은 암석 성분들이 *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Cyanobacteria*, *Proteobacteria* phylum에게 유의한 영향 보였으며, 곰팡이 군집에서는 Si와 Ca는 *Sordariomycetes*, Fe와 Na는 *Eurotiomycetes*, Mg는 *Lecanoromycetes*, P는 Full community에게 유의한 영향을 보였다.

표 1-14. 암석성분과 미생물 군집 간의 상관관계

Bacterial Phyla	Mantel test based on Spearman's rank correlation ^a									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO
Full community	0.36	0.39	0.41	0.29	0.57	0.47	0.39	0.42	0.41	0.10
Acidobacteria	0.05	0.23	0.05	0.02	0.32	0.04	0.23	0.05	0.13	0.06
Actinobacteria	0.31	0.39	0.37	0.16	0.44	0.37	0.37	0.40	0.36	0.05
Bacteroidetes	0.36	0.39	0.41	0.29	0.57	0.47	0.39	0.42	0.41	0.10
Chloroflexi	0.35	0.10	0.30	0.23	0.32	0.45	0.09	0.33	0.24	0.13
Cyanobacteria	0.27	0.52	0.65	0.34	0.62	0.63	0.53	0.26	0.68	0.37
Proteobacteria	0.36	0.47	0.55	0.49	0.76	0.62	0.48	0.35	0.59	0.30
Fungal Classes	Mantel test based on Spearman's rank correlation ^a									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO
Full community	-0.01	0.46	0.80	0.55	0.59	0.66	0.46	-0.03	0.46	0.24
Dothideomycetes	-0.39	-0.15	-0.30	-0.12	-0.30	-0.13	-0.15	-0.25	-0.12	-0.19
Eurotiomycetes	-0.23	0.35	0.63	0.72	0.41	0.49	0.35	-0.17	0.37	0.48
Lecanoromycetes	0.23	0.38	0.51	0.43	0.78	0.28	0.38	0.20	0.38	0.41
Leotiomycetes	-0.14	-0.08	-0.30	-0.25	-0.38	-0.12	-0.08	-0.01	-0.04	-0.01
Sordariomycetes	0.51	-0.47	-0.46	-0.60	-0.69	0.08	-0.47	0.53	-0.47	-0.59

*유의한 상관관계가 있는 것은 진하게 표시

카. 암석 미생물의 계통 발생적 유연관계 분석

북극 다산과학기지 주변 암석에 서식하는 미생물이 해당지역(저온, 건조한 극지 환경)에 존재하는 특이적 미생물인지 또는 다른 지역에도 존재하는 일반 미생물인지 알아보기 위해 계통 발생적 유연관계를 분석하였다.

분석을 위해 암석 미생물 중 가장 많이 발견되는 OTU sequence 상위 3개를 NCBI database에 검색하여 가장 유연관계가 높은 종을 선정하고 그 종이 분리된 지역과 시료의 종류를 비교하였다.

그 결과 박테리아 군에서는 대부분 남극, 알프스 고산지대, 그린란드, 노르웨이 북극지역에서 분리된 종들과 유연관계가 높은 것으로 나타났으며, 이것은 연구지역의 암석미생물이 저온, 건조한 극지역에 주로 서식하는 박테리아 종이라는 것을 알 수 있었다(표 1-15).

곰팡이 군에서는 대부분 북아메리카 북극지역, 남극, 알래스카, 아이슬란드 지역에서 분리된 종들과 유연관계가 높은 것으로 나타났으며, 이것은 연구지역에 존재하는 곰팡이류는 저온, 건조한 환경에 특이적으로 존재하는 종들로 구성되어 있음을 알 수 있었다(표 1-16).

표 1-15. 암석 미생물 계통발생적 유연관계 분석 (박테리아 군)

Lithology	Bacterial OTU	Sequences per sample (%)	Closest sequence from NCBI nucleotide database/Accession number	Percent identity (%)	Isolation source
Sandstone	DS1_05	8.52	Uncultured actinobacterium/EU931059	98.4	Antarctic Dry Valley, mineral soils
	DS1_11	6.38	Uncultured acidobacteria/FJ895045	98.4	Antarctic Dry Valley, mineral soils
	DS1_18	6.34	Uncultured bacterium/HQ197614	97.5	Antarctic Miers Valley, quartz rocks
Sandstone	DS2_04	6.92	Uncultured Acetobacteraceae bacterium/AM940870	97.0	Arctic Ny-Alesund, glacier
	DS2_05	4.76	Uncultured actinobacterium/KJ849444	98.2	Antarctic soil
	DS2_26	3.94	Uncultured bacterium/GU219533	97.2	Icelandic volcanic glasses
Limestone	DS3_19	5.87	Uncultured bacterium/HQ197559	98.7	Antarctic Dry Valleys, quartz rocks
	DS3_15	3.37	Uncultured alpha proteobacterium/FJ490246	97.5	Antarctic Dry Valleys, rock
	DS3_28	2.79	Uncultured actinobacterium/FN811249	97.7	Antarctica Alexander Island, soil
Chert	DS10_03	21.88	Uncultured bacterium/JX258090	97.7	Arctic thermal spring, rock
	DS10_04	13.99	Uncultured Acetobacteraceae bacterium/AM940870	97.0	Arctic Ny-Alesund, glacier
	DS10_15	6.71	Uncultured endolithic bacterium/AB473921	98.1	Switzerland, central Alps
Granite	L7_10	14.68	<i>Arthrobacter</i> sp./KP756677	97.7	Antarctic Victoria Land, stone
	L7_44	3.57	<i>Nocardiooides</i> sp./KF974316	97.3	Greenland, soil
	L7_13	2.08	<i>Arthrobacter</i> sp./KP717965	97.5	Antarctic Dry Valley, rocks
Travertine	L10_01	9.35	Uncultured cyanobacterium/KM112123	97.0	Antarctic microbial mat
	L10_16	6.48	Uncultured bacterium/JX258070	97.5	Arctic thermal spring, rock
	L10_02	5.53	Uncultured <i>Deinococcus</i> sp./FJ895047	97.4	Antarctic Dry Valleys, soil
	L11_02	8.22	Uncultured <i>Deinococcus</i> sp./FJ895048	97.4	Antarctic Dry Valleys, soil

	L11_06	8.12	Uncultured cyanobacterium/DQ181690	97.2	Antarctic Rauer Islands
	L11_01	7.78	Uncultured cyanobacterium/KM112123	96.8	Antarctic microbial mat
	L12_02	9.55	Uncultured <i>Deinococcus</i> sp./FJ895047	97.4	Antarctic Dry Valleys, soil
	L12_08	8.61	Uncultured cyanobacterium/HE860791	97.9	Norway, cold desert, soil
	L12_01	7.56	Uncultured cyanobacterium/KM112123	97.0	Antarctic microbial mat
	L15_14	9.76	Uncultured bacterium/KM120111	97.5	Argentina, rock (pumice)
	L15_23	6.92	<i>Sporosarcina</i> sp./GU047418	97.8	Arctic permafrost soil
	L15_09	2.91	Uncultured Sphingomonadaceae bacterium/HE860905	98.4	Norway, cold desert, soil
Basalt	L23_13	11.70	<i>Arthrobacter</i> sp./KP756683	97.7	Antarctic Victoria Land, stone
	L23_17	10.51	Uncultured Nocardioidaceae bacterium/HE861127	97.7	Norway, cold desert, soil
	L23_07	7.03	Uncultured bacterium/JX098493	98.2	Atacama desert, soils

극지연구소

표 1-16. 암석 미생물 계통발생적 유연관계 분석 (곰팡이 군)

Lithology	Fungal OTU	Sequences per sample (%)	Closest sequence from NCBI nucleotide database/Accession number	Percent identity (%)	Isolation source
Sandstone	DS1_04	24.8	<i>Ramalina terebrata</i> /EU161239	96.1	Antarctica, lichen
	DS1_05	21.5	Uncultured fungus/KC965830	96.1	North American Arctic, soil
	DS1_06	11.8	<i>Sphaerophorus globosus</i> /EF489917	94.9	Antarctica, lichen
Sandstone	DS2_02	91.0	Uncultured fungus/KC965541	95.7	North American Arctic, soil
	DS2_10	1.5	Uncultured fungus/KC965931	97.3	North American Arctic, soil
	DS2_31	1.1	Dothideomycetes/JQ760107	95.1	Alaska, rock
Limestone	DS3_01	84.1	<i>Verrucaria</i> sp./FJ664858	98.2	Iceland, rock
	DS3_08	5.5	Chaetothyriales/KT263133	96.0	Austria, alpine rock
	DS3_12	2.6	<i>Thamnogalla crombiei</i> /KJ559557	93.2	Iceland
Limestone	DS10_01	45.5	<i>Verrucaria margacea</i> /KM243204	97.6	Norway, rock
	DS10_03	39.6	Uncultured fungus/KC965115	93.5	North American Arctic, soil
	DS10_20	2.3	<i>Placopsis contortuplicata</i> /EF489925	95.7	Antarctic lichen
Travertine	L7_14	38.6	<i>Tetracladium</i> sp./AB752249	98.5	Antarctic
	L7_27	16.9	<i>Leotiomycetes</i> sp./JQ759612	97.6	Alaska, rock
	L7_42	4.8	Helotiales/JX852415	96.7	Antarctic bryophytes
Travertine	L11_07	70.2	<i>Polycauliona verruculifera</i> /JQ301564	94.9	Iceland
	L11_01	18.5	Uncultured fungus/KC966368	98.5	North American Arctic, soil
	L11_10	1.7	Uncultured fungus/KF296796	98.8	North American Arctic, soil

제 2 절 중앙로벤빙하 후퇴지역의 대기 특성 이해

1. 빙하 후퇴 지역 대기-토양 온실기체 교환 현장연구 수행

가. 중앙로벤빙하 후퇴 지역에서의 토양 이산화탄소 플럭스 관측

중앙로벤빙하 후퇴 지역에서 토양 관련 정보(토양 특성 및 유기물 함량 등)와 식생 정보가 동시에 조사된 지역을 고려하여 세 개의 횡단선(transect)을 정하고, 각 transect에서 5지점(M1: 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5; M3: 3-1, 3-2, 3-3, 3-4, 3-5) 또는 7지점(M2: 2-0, 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6)을 선정하여 빙하 후퇴에 따른 토양 이산화탄소 플럭스의 변화를 확인하고자 하였다(그림 2-1).



그림 2-1. 중앙로벤빙하 후퇴 지역의 세 transect의 관측 지점

빙하로부터 멀어질수록 토양 표면의 유기물층(biological soil crust)이 발달되어 있고, 현화 식물 및 이끼 그리고 지의류가 발달되어 있으며 작은 입자의 토양을 함유하여 있었다(그림 2-2).

일부 transect 중간 지점의 경우, 빙하가 후퇴하면서 지형이 분리되거나 흘러내리면서 새롭게 드러난 언덕은 매우 건조하면서 유기물이 전혀 발달되지 않은 토양 표면을 보이기도 하였고, 지형이 변화해 가는 과정 중에 생긴 호수 또는 작은 웅덩이 그리고 빙하가 녹으면서 형성되는 천(stream)에 의하여 영향을 받는 지면은 토양 수분량이 상대적으로 많거나 특이한 표면 형태(ripple)를 보이기도 하였다.

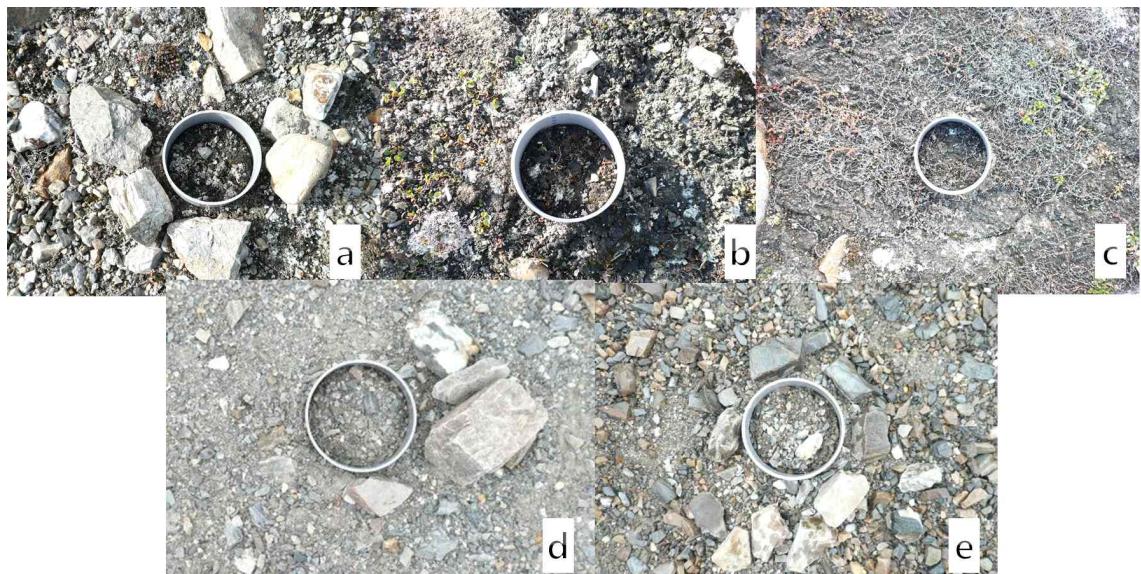


그림 2-2. 중앙로벤 빙하 지역 M1 transect의 토양 이산화탄소 플럭스 측정 지점(a. M1-1, b. M1-2, c. M1-3, d. M1-4, e. M1-5)

관측에 사용된 장비는 휴대용 토양 이산화탄소 플럭스 장비(Li-cor 6400)와 토양 온도 및 토양 수분센서로 각 관측 지점에서 최소 2-3회 이상 관측을 실시하였다(그림 2-3).



그림 2-3. 토양 이산화탄소 플럭스 측정에 사용된 휴대용 챔버 시스템

나. 중앙로벤 빙하 지역에서의 토양 이산화탄소 플럭스 및 환경 인자 관측 결과

중앙로벤빙하 후퇴 지역의 각 transect M1, M2, M3의 각 지점에서 관측된 토양 이산화탄소 플럭스 결과에서는, 대체적으로 빙하에서 면 후퇴지역에서 큰 값을 보였으나, 중간 지점에서 다양한 변화를 보였다(그림 2-4).

세 transect에서 풀럭스 값의 차이를 보였는데, M1과 M2의 결과는 $0.1\text{--}0.8 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 다양한 범위의 토양 이산화탄소 풀럭스를 보이는 반면, M3의 경우는 $0.1\text{--}0.3 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 범위로 비교적 작은 값이 관측되었다.

빙하 후퇴에 따른 토양 이산화탄소 풀럭스의 차이를 규명하기 위해서는 각 지점에서 조사된 토양 특성 및 식생분포와의 상관성 또한 토양 미생물 활성도와의 관계를 조사하여야 한다.

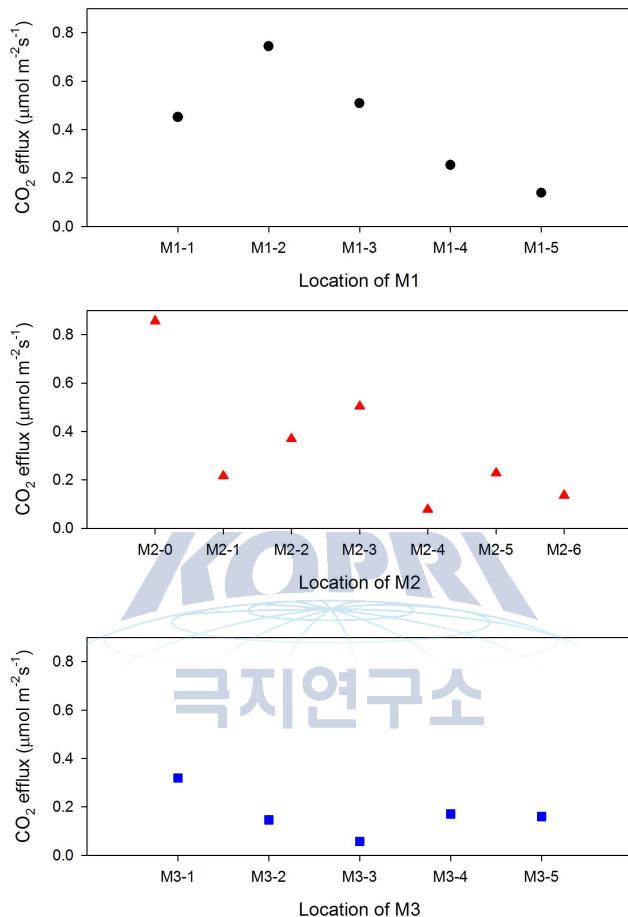


그림 2-4. 빙하 후퇴에 따른 세 transect의 각 지점에서 관측된 토양 이산화탄소 풀럭스

중앙로벤빙하 M1, M2, M3 각 transect에서 관측된 토양 이산화탄소 풀럭스 결과와 동시에 관측된 토양 온도과의 관계를 살펴보면, M1의 경우는 토양온도 8°C 전후에서 다양한 범위 ($0.2\text{--}0.8 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)의 이산화탄소 풀럭스가 관측되었고, M2에서는 예상과는 달리 온도가 증가할수록 비교적 작은 값을 보였으며, M3의 결과에서는 M1에서와 같이 14°C 전후에서 다양한 범위 ($0.1\text{--}0.6 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)의 이산화탄소 풀럭스가 관측되었고, M2와 같이 대체적으로 온도가 증가할수록 작은 값을 보였는데, 이러한 결과는 빙하후퇴지역에서는 토양 온도 외에 다른 환경 인자 또는 토양 특성에 따른 차이에 의하여 토양 이산화탄소 방출이 좌우되었음을 추정할 수 있었다.

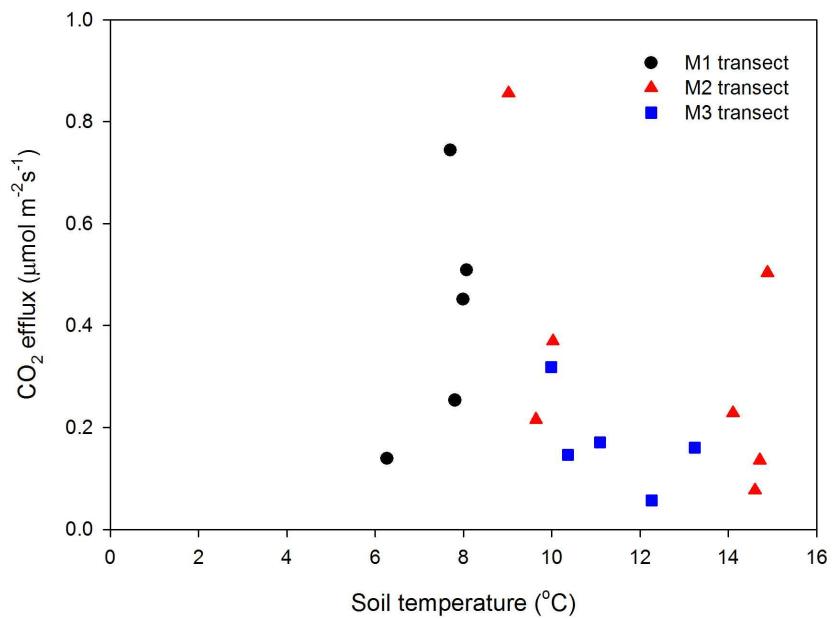


그림 2-5. 토양 이산화탄소 플럭스와 토양 온도와의 관계

중앙로 벤빙하 M1, M3 각 transect에서 관측된 토양 이산화탄소 플럭스 결과와 동시에 관측된 토양 수분과의 관계를 살펴보면, 대체적으로 토양 수분과는 양의 상관관계를 보이며 수분량의 증가함에 따라 토양 이산화탄소 플럭스가 증가하였다.

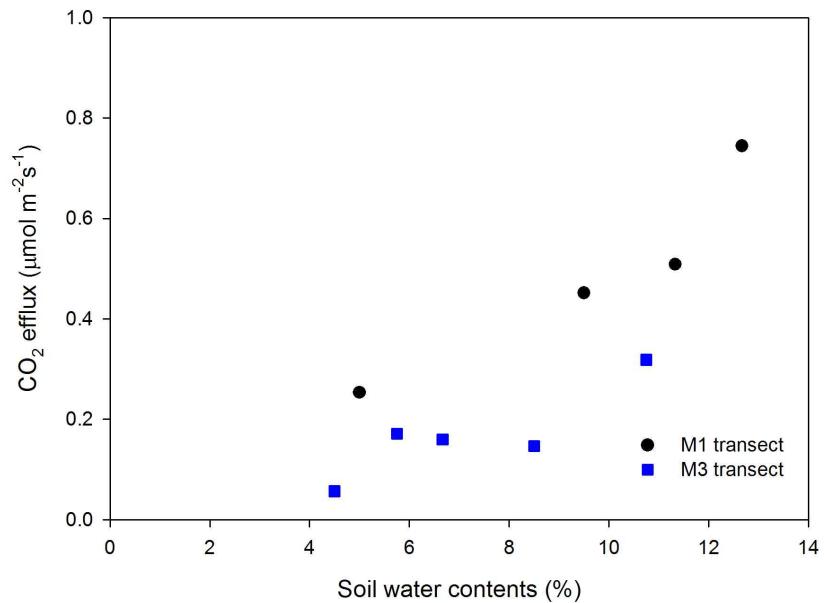


그림 2-6. 토양 이산화탄소 플럭스와 토양 수분과의 관계

2. 현장 포집 기체의 이산화탄소 가스 농도 측정

가. 이산화탄소 농도 측정을 위한 현장 기체 포집

이산화탄소를 비롯한 메탄 및 아산화질소 등 다양한 온실기체의 농도를 조사하기 위하여 M1 transect의 토양 이산화탄소 플럭스가 관측된 다섯 지점 주변에서 동시에 기체를 포집하였다 (그림 2-7).

포집 방법은 토양에서 대기로 방출되는 이산화탄소 농도의 변화를 살펴보기 위하여, 밀폐된 챔버를 이용하여 주사기로 15분 간격으로 한 시간 동안 기체를 포집하였다. 포집된 기체는 가스 그래마토 그래피를 이용하여 이산화탄소 등의 온실기체의 시간변화에 따른 농도 변화를 확인할 예정이다.



그림 2-7. 현장에서의 밀폐챔버를 이용한 기체 포집

제 3 절 다산기지주변 고생대 층서 및 고환경 규명

1. 다산기지주변 후기고생대 층서

가. 다산기지 주변 지질개요

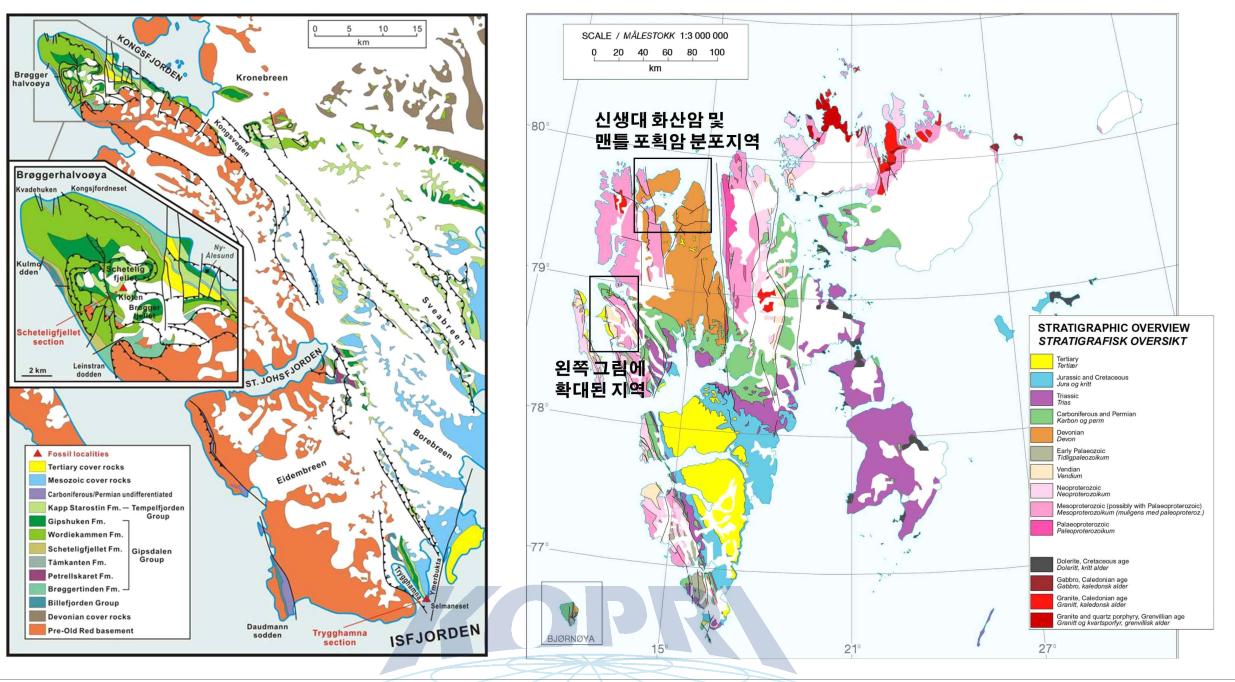


그림 3-1 다산기지주변(좌)와 스발바르 군도(우)의 지질도

다산기지는 스발바르 군도 스피츠베르겐섬 북서쪽에 위치한 브뢰기반도 북쪽해안의 뉘알레순에 위치하고 있으며, 기지의 동쪽에는 주로 칼레도니안 기반암이 노출되어 있으며, 서쪽에는 변형을 받은 후기고생대-신생대 퇴적암이 노출되어 있다(그림 3-1, 그림 3-2). 브뢰기반도가 포함된 스피츠베르겐 서쪽은 신생대(제3기) 지체구조운동에 의한 압축력에 의해 북서-남동 방향으로 발달한 단층과 습곡이 집중되어 있으며 서스피츠베르겐 습곡-스러스트대(West Spitsbergen Fold-and-Thrust Belt)라고 불린다(Saalmann and Thiedig, 2002). 이 변형작용은 칼레도니안 변성작용을 받은 기반암과 그 위에 쌓인 퇴적암에 모두 영향을 끼쳤다. 압축력은 남서쪽에서 북서쪽방향으로 작용했으며 서쪽 퇴적암들은 이에 따라 발달한 4개 스러스트 쉬트(nappe)의 중첩으로 대별된다(그림 3-1). 즉 현재는 서로 인접해 있는 퇴적층일지라도, 퇴적 당시에는 상대적으로 먼 거리에 위치해 있었던 것이다. 이 때문에, 각 스러스트에 존재하는 퇴적암층은 서로 다른 특징을 가지고 있으며, 상세한 주상도 작성 및 연대 측정을 통한 층서 재구성이 선행되어야 고환경을 비롯한 퇴적학적·고생물학적 연구를 수행할 수 있다.

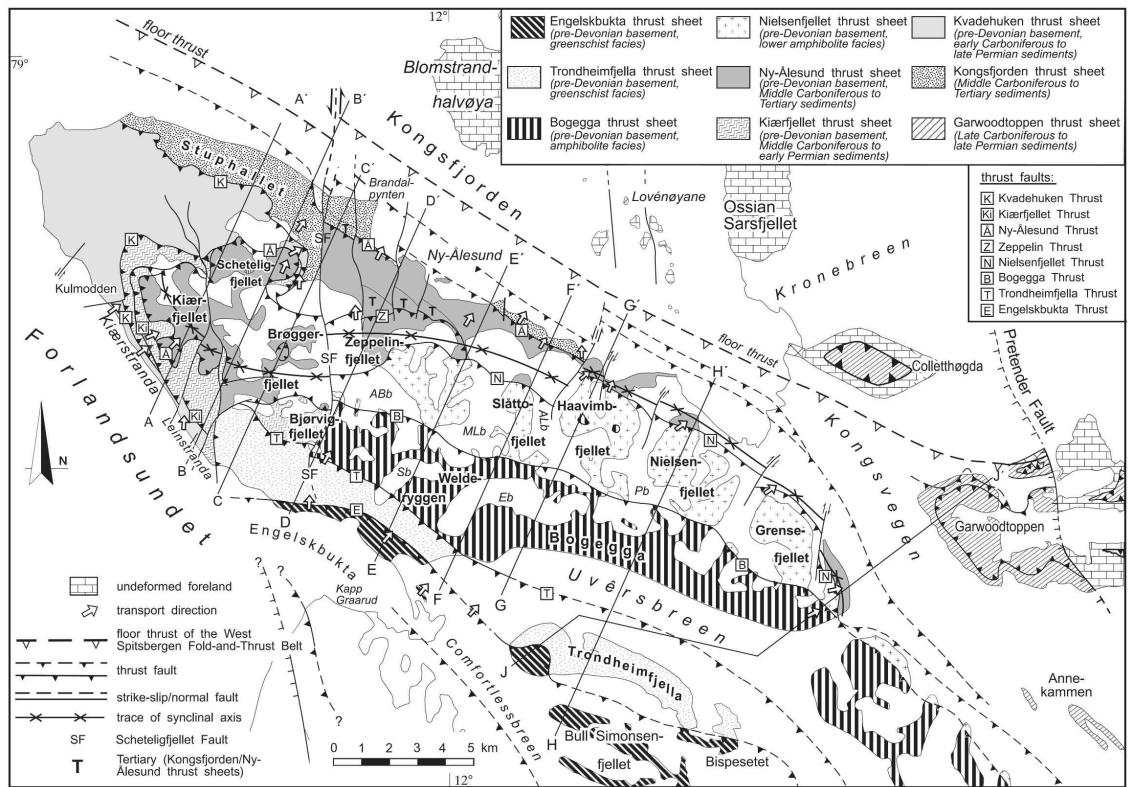


그림 3-2 다산기지주변 브뢰기반도의 지체구조를 나타낸 지질도. 스러스트 단층에 의한 스러스트쉬트를 중심으로 작성되어 있다(Saalmann and Thiedig, 2002). ABb - Austre Brøggerbreen, MLb - Midre Lovénbreen, ALb - Austre Lovénbreen, Pb - Pedersenbreen, Eb - Edithbreen, Sb - Steenbreen.

다산기지 서쪽의 퇴적층은 석탄기에서 신생대에 이르는 퇴적분지의 발달을 기록하고 있으며, 3개의 후기고생대 층군, 1개의 중생대 층, 1개의 신생대 층군으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 이中最 넓은 분포를 가지는 후기고생대층에 집중하였다.

나. 다산기지 주변 후기고생대 충서

다산기지 주변 후기고생대 퇴적층은 하부로부터 빌레피요르덴(Billefjorden) 층군, 깁스달렌(Gipsdalen) 층군, 템펠피요르덴(Tempelfjorden) 층군으로 나누어져 있다(그림 3-3, 그림 3-4). 빌레피요르덴 층군은 오루스트달렌(Orustdalnen) 층으로 이루어져 있으며 전기석탄기층으로 알려져 있다. 오루스트달렌 층은 다양한 사암과 역암으로 이루어져 있으며 상부에 세일이 발달하며 하성층으로 해석된다(Fairchild, 1982). 빌레피요르드 층군 위에는 깁스달렌 층군이 위치하며, 최하부의 브뢰거틴덴(Broggertinden) 층, 세텔리그피예렛(Scheteligfjennet) 층, 워디에카멘(Wordiekammen) 층, 깁슈肯(Gipshuken) 층으로 구성된다.

브뢰거틴덴층은 붉은색 역암과 사암 그리고 사이에 끼는 이암으로 이루어져 있으며 최상부에는 이와 함께 토양화 작용과 관계된 캘크리트가 발견된다. 브뢰거틴덴층은 하천 또는 얕은 바다에서 형성된 것으로 해석되었다. 세텔리그피예렛층은 이 지역 후기고생대 지층 중 최초로 해양기원 석회암이 나타나는 층이며, 화석이 많은 석회암과 펠로이드 석회암, 이에 협재하는 사암으로 이루어져 있다. 오루스트달렌층에서 세텔리그피예렛층은 St. Jondfjorden Trough의

발달과 관계된 단층/변형동시성 퇴적층으로 생각되고 있다. 워디에카멘층은 두꺼운 백운암과 석회암으로 이루어져 있으며 석회암에는 필로이달앨지, 팔레오어플리시나, 태형동물 등 다양한 고착성 생물에 의한 생물초가 나타난다. 워디에카멘층은 하부의 뮤레브린(Mørebreen)층원과 상부의 티렐피예렛(Tyrrellfjellet)층원으로 구분된다. 다른 지역에서는 푸줄리니드가 많이 포함된 흑색석회암인 브루스뷔엔 베드(Brucebyen Bed)로 경계가 정의되지만 이 지역에서는 트라우달렌(Traudalen) 단면을 제외하고는 부르스뷔엔 베드가 산출되지 않아 층경계를 다시 정의할 필요가 있다. 킵슈肯층은 석회각력암과 엽리를 가지는 백운암등으로 이루어져 있다. 이 두 층은 비교적 안정적인 탄산염 대지에서 형성된 것으로 해석되었다. 최상위에 위치하는 템펠피요르덴층군은 캡스타로스틴(Kapp Starostin)층으로 구성되며 두꺼운 처트층이며, 최하부에는 특별한 완족류화석이 산출되는 석회암이 나타난다. 캡스타로스틴층의 처트는 따뜻한 바다의 생물 그룹과 다른 차가운 바다의 생물군에 의한 퇴적물이 지배적이었음을 나타내며, 이는 뚜렷한 해수의 수온변화가 이루어졌음을 지시한다.

Lithostratigraphic correlation scheme of the late Paleozoic strata of the Svalbard

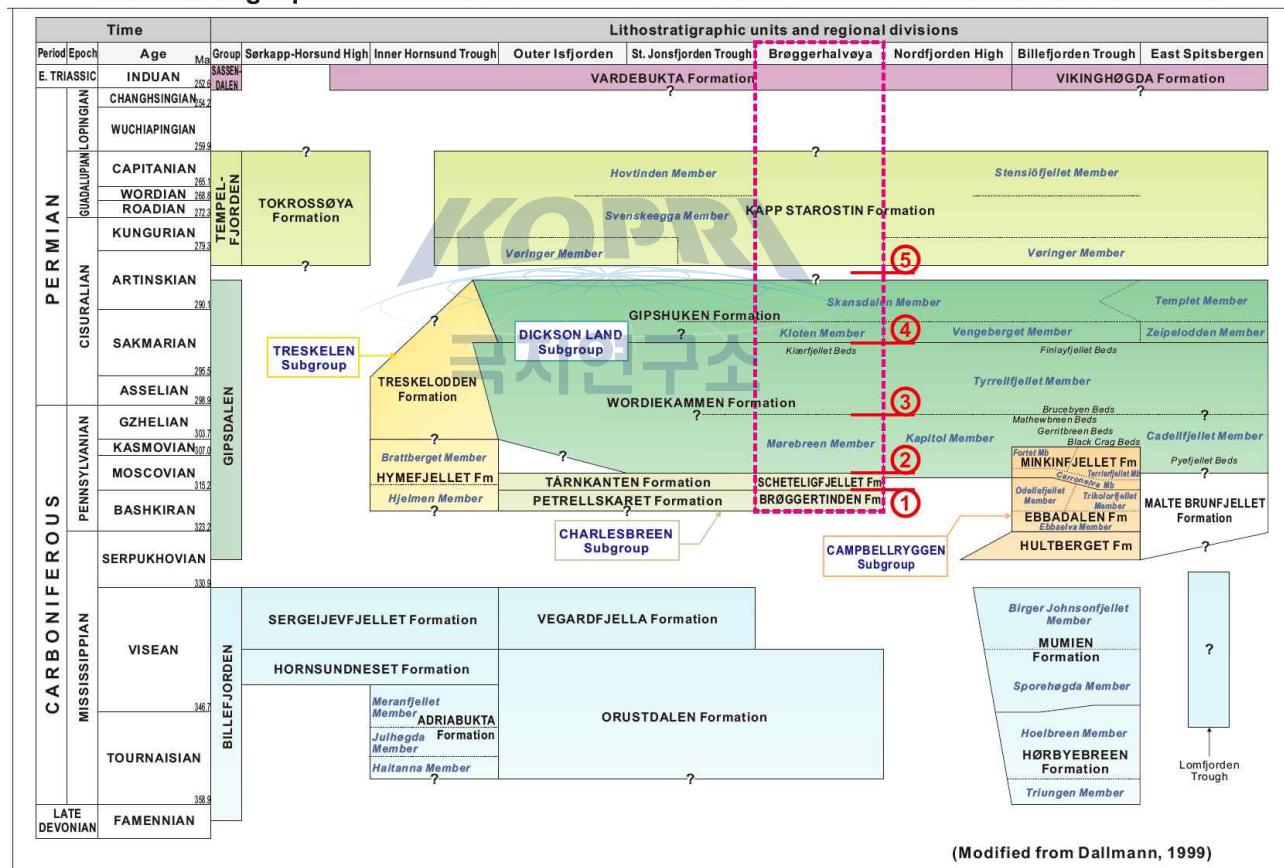


그림 3-3. 스발바르 후기고생대 지층의 층서를 정리한 표. 가로축은 이 시대 지층이 나타나는 스발바르 지역이며, 각 지역별로 서로 다른 특성의 지층이 나타남(Dallmann et al., 1999). 브뢰기반도에 해당하는 부분은 붉은 점선으로 표시하였으며, 본 보고서에서 다루는 층 경계를 원안의 숫자로 표시하였음.

Stratigraphy			Lithology		deformation, structural role
	Tertiary	Van Mijenfjorden Group			
Tertiary	Ny-Ålesund Fm Leirhau- gen Mb	Bøyleva Mb	≥180 m	conglomerates, sandstones, shales, coal seams	open flexural slip folding (sandstones), tight folds (shales); shear horizons located in shales and coal seams;
		Kongs- fjorden Fm Kolhaugen Mb	0 - 110 m		
Triassic	Varde- bukta Fm		50 m	dark shales	local relics; minor influence on the structural geometry
Permian	Tempel- fjorden Group	Kapp Starostin Fm	90- 230 m	cherts, silicified limestones; top: glauconitic sandstones	brittle fracturing, local folding of glauconitic sandstones
		Skansdalen Gipshukken Fm Kloten Mb	40 - 140 m	carbonate breccia and laminated dolomites, marls	
Carboniferous	Gipsdalen Group	Wordie- fjellet Mb kammen Fm Mør- breen Mb	290 m	alternation of limestones and dolomites containing abundant cherty nodules	laminated dolomites & marls = weak layers and detachment horizons fracturing, imbrication; local flexural slip folding; imbrication, fracturing; local flexural slip folding; thinly bedded Kærfelet Beds (dolomites of the Tyrellfjellet Member) are important detachment horizons
		Schetelig- fjellet Fm	8 - 120 m	predominant limestones, dolomites, intercalated with sandstones and siltstones	
		Brøgger- tinden Fm	13 - 300 m	conglomerates, sandstones, in upper parts intercalated with limestones and dolomites	
Bille- fjorden Group	Orust- dalen Fm		100 - 225 m	various sandstones and conglomerates, to the top intercalated with shales	shales = weak layers of local importance, flexural folding; fracturing, imbrication (local on a decametric scale)
pre-Devonian (Caledonian) basement				phyllite, mica schist, quartzite, marble, gneiss, diamictite; middle greenschist to high amphibolite facies	fracturing, imbrication, in dolomite marbles local flexural slip folding

그림 3-4. 브뢰기 반도의 층서표(Saalmann and Thiedig, 2002). Gp - Group, Fm - Formation, Mb - Member.

다. 다산기지 주변 주요 단면

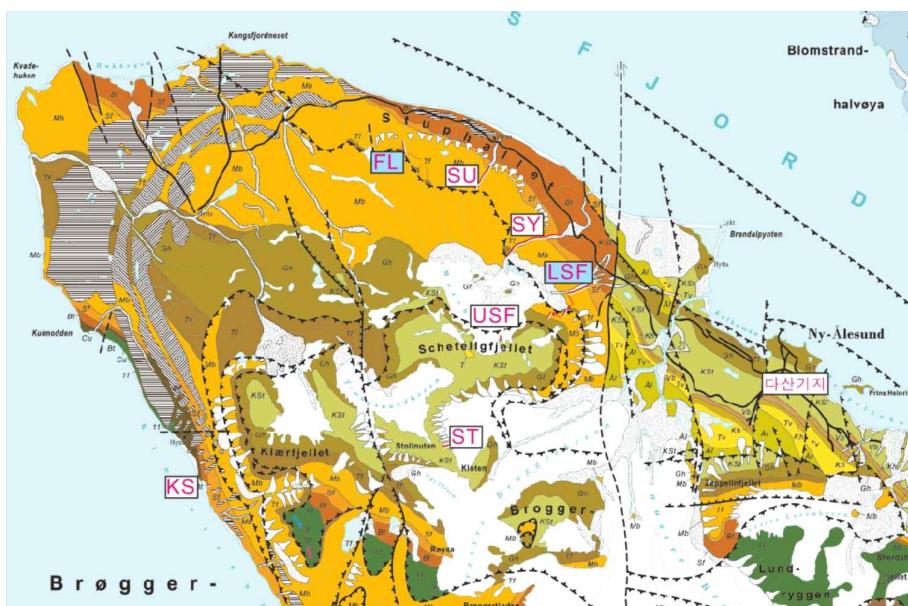


그림 3-5. 다산기지 주변 주요 지질단면 위치

다산기지 서쪽에서 후기고생대 지층이 잘 드러나는 단면 7개에 대한 상세 조사를 실시하여 주상도를 작성하고 암석 및 화석 시료를 채취하였다. 횡적으로 대비되는 여러 단면을 확보함으로써 이지역 퇴적층의 정밀한 횡적대비가 가능해졌다. 워디에카멘층 중부의 필로이드앨지 빌드업 상부의 퇴적상은 횡적 연장이 좋은 반면, 하부의 퇴적상은 연장성이 매우 불량하다. 이는 탄산염대지의 퇴적상패턴이 모자이크 형태에서 좀 더 단순한 형태로 진화했음을 시사한다.

(1) 키에르스트란다(Kiærstranda) 단면

브뢰기반도 남쪽해안에 위치한 키에르스트란다 단면은 브뢰거틴덴층과 세텔리그피예렛층 사이의 경계가 잘 노출되어 있다(그림 3-6). 특히 층 경계부가 잘 드러나 있으며 브뢰거틴덴층의 최상부 역암의 기질과 이암에 캠크리트가 잘 발달한다. 이 지역에서는 세텔리그피예렛층의 최하부에 발달하는 루고스 산호와 캐티티드가 형성한 대규모 생물초가 매우 특징적이고 다른 섹션과 차별된다. 퇴적분지가 해침되기 시작하는 때의 퇴적체 형성을 지역적 차이가 매우 커음을 반영한다.

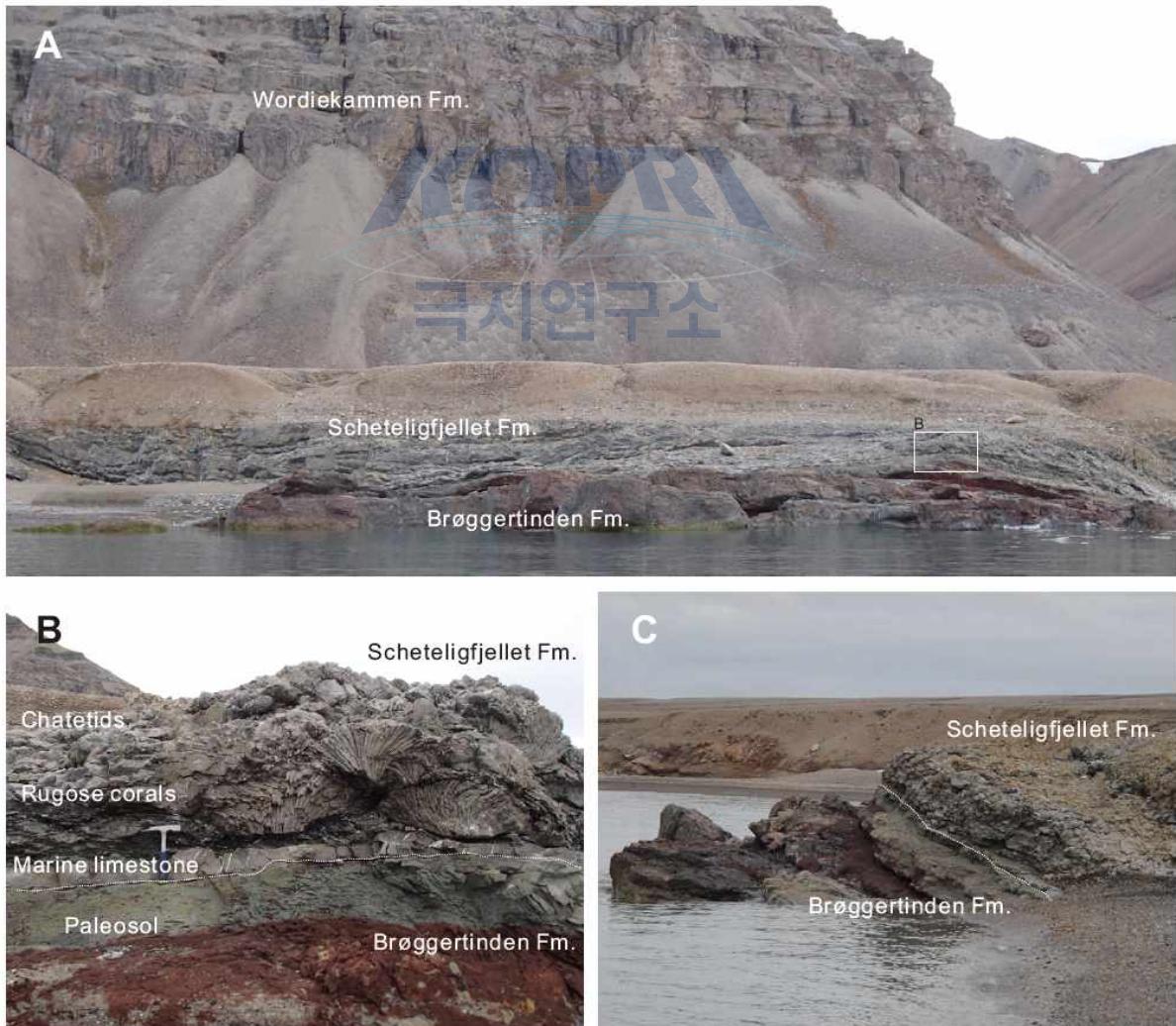


그림 3-6. 키에르스트란다 섹션. A, Overview of the Stupbekken section. B, Alternating red sandstone and mudstone of the Brøggertinden Formation. C. Skeletal limestone of the

Scheteligfjellet Formation. D, Coral limestone of the Scheteligfjellet Formation. E, Lower part of the Mørebreen Member.

키에르스트란다 단면에서 북쪽으로 연장된 트라우달렌(Traudalen) 단면(그림 3-7)에도 최하부 브뢰거틴덴 층에서 깁슈肯층에 이르는 퇴적암이 노출되어있지만, 충화가 심하게 되어 보존상태가 불량하다. 대비되는 스트립베켄 단면에 비해 세텔리그피예렛층에 더 많은 쇄설성 퇴적물이 포함되어있으며 하부에 유사한 산호 군집이 확인된다. 가까운 키에르스트란다 단면과도 다르게 대형 산호초는 없지만, 이에서 유래한 것으로 생각되는 재동된 산호들을 다수 발견하였다. 상부의 워디에카멘층에서는 이 지역에서 유일하게 산출된다고 알려진 Brucebyen Bed(fusulinid가 대량 산출되고 많은 유기물을 함유한 석회암)를 확인하고 및 시료를 채취하였다.

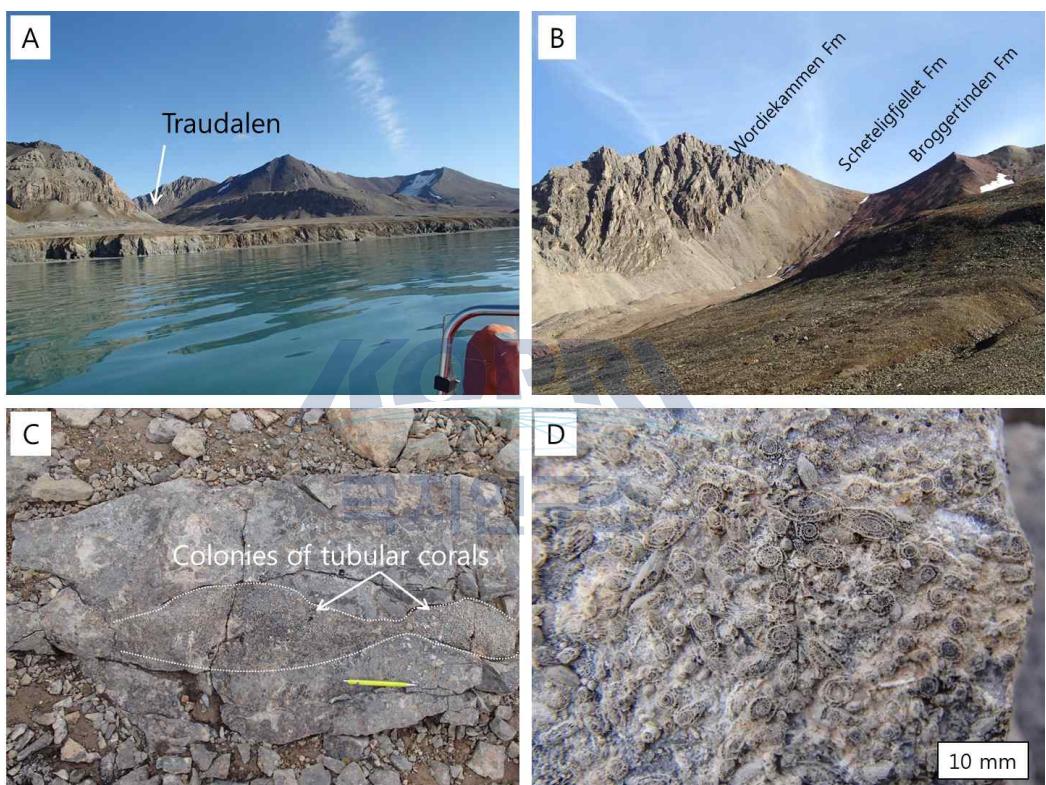


그림 3-7. 트라우달렌 단면. A. 해안에서 바라본 트라우달렌 단면. B. 트라우달렌 북쪽의 능선에 노출된 석탄기 퇴적층. 워디에카멘층에서 상당한 변형 구조가 관찰된다. C. 세텔리그피예렛층 하부에서 발견된 산호 군집. 인근의 키에르스트란다 단면과는 다른 작은 환상산호 군집으로 나타난다. D. Brucebyen Bed에 나타나는 fusulinid 화석.

(2) 스트립베켄(Strypbekken) 단면

스트립베켄은 다산기지 북서쪽 4.6km 지점에 위치한 계곡이다. 이 지역의 해안부터 내륙방향으로 이어진 개천과 계곡을 따라 후기고생대 지층이 연속적으로 노출되어있다(그림 3-8). 해안의 브뢰거틴덴층은 적색 사암과 이암, 역암으로 이루어져 있으며, 최상부의 캐크리트도 잘 발달한다. 세텔리그피예렛층은 소규모 단층으로 최소 한번 반복되어 나타나며 펠로이드와 소형 유공층으로 이우러진 회색 석회암과 극피동물, 태형동물이 많이 포함된 백색 석회암이 특징적이다. 상부에 사암층이 1매 발견된다. 워디에카멘층은 쳐트가 포함된 두꺼운 백운암과 생물파편으로 이루어진 석회암으로 이루어져 있다. 층의 중부에는 태형동물, 필로이달앨지, 팔레오어

플리시나로 이루어진 생물초가 발견되며, 필로이달엘지와 팔레오어플리시나 생물초는 횡적 연장성이 좋은 편이다. 팔레오어플리시나 생물초 상위로 발달하는 티렐피예렛 층원은 밝은 회색의 백운암으로 특징지어진다.



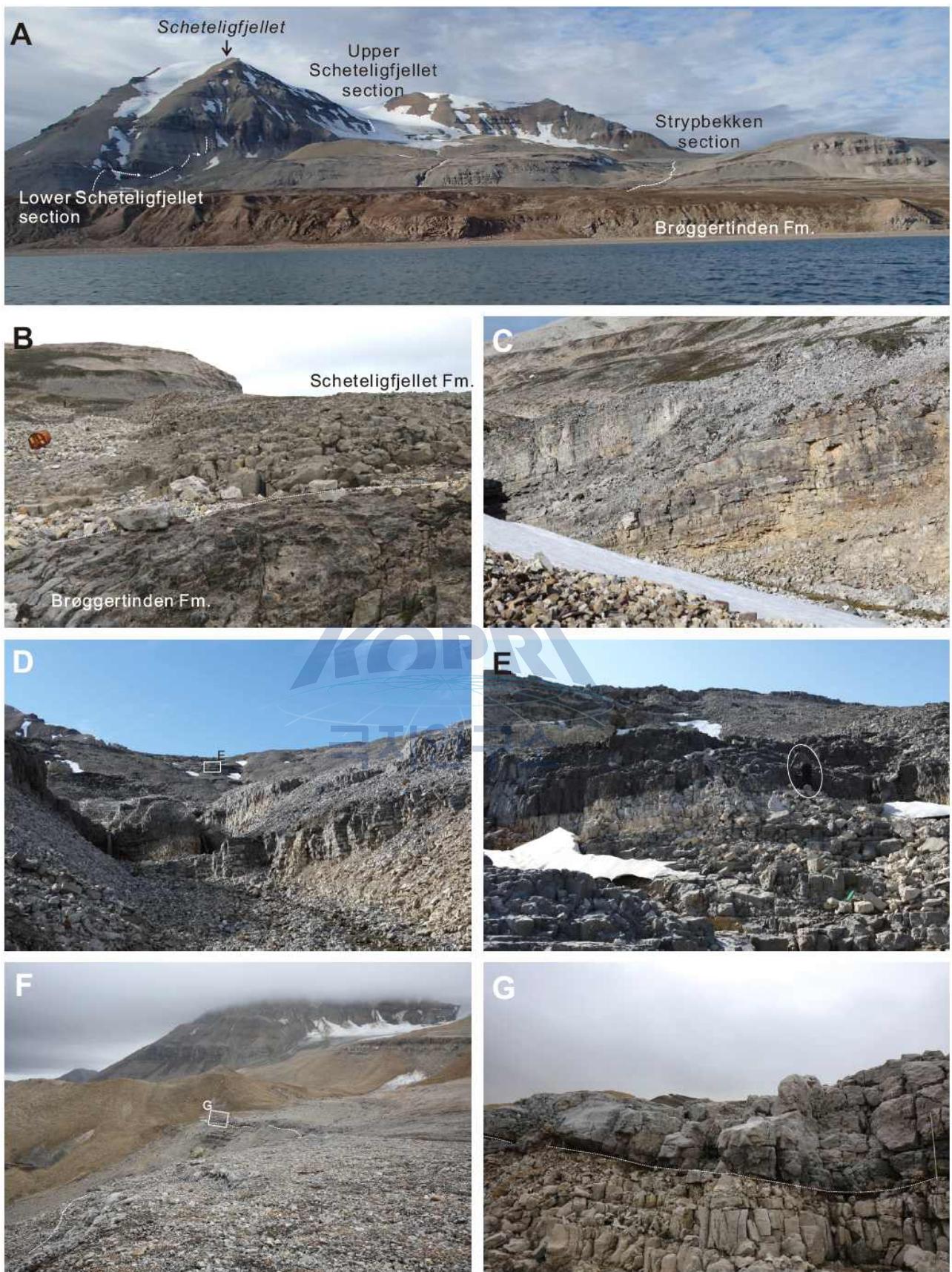


그림 3-8. 스트립베肯 단면. A, Overview of the Strypbekken section. B, Boundary between Brøggertinden and Scheteligfjellet formations. C, Lower part of the Mørebrean Member. D-E, Middle part of the section exposing characteristic alternation of black lime

mudstone and light dolomudstone. Waterfalls in D are ca. 7 m high. F-G, Laterally extensive palaeoplysina buildup in the section, indicating Tyrellfjellet Member. The base is marked by broken lines.

(3) 스투프베켄(Stupbekken) 단면

스튜프베켄 단면은 스트립베켄에서 북서쪽으로 약 1.5km 떨어져 있는 계곡이다. 계곡을 따라 세텔리그피예렛층과 워디에카멘층이 노출되어 있다(그림 3-9). 이 지역 해안에 브뢰거틴덴층이 일부 노출되지만 연속적이지 않아 조사대상에서 제외하였다. 세텔리그피예렛층의 하부 경계는 노출되지 않으며 회색 석회암과 백색 석회암으로 구성되어 있다. 상위의 워디에카멘층은 쳐트가 포함된 두꺼운 백운암과 석회암으로 이루어져 있으며, 중간에 판상산호의 군집이 잘 나타난다. 또한 상부에 군집형 루고스산호와 캐티티드가 이룬 소형 생물초가 발달한다. 단면의 상부에 약 10m 두께의 석회각력암이 발달하며 각력암 상부의 노두는 연구1, 2년차에는 드러나있지 않았지만, 3차년도에는 해당부분의 눈이 대량으로 녹아 새로 드러나 처음으로 조사할 수 있었으며, 대부분 밝은 회색은 백운암으로 기재되었다.



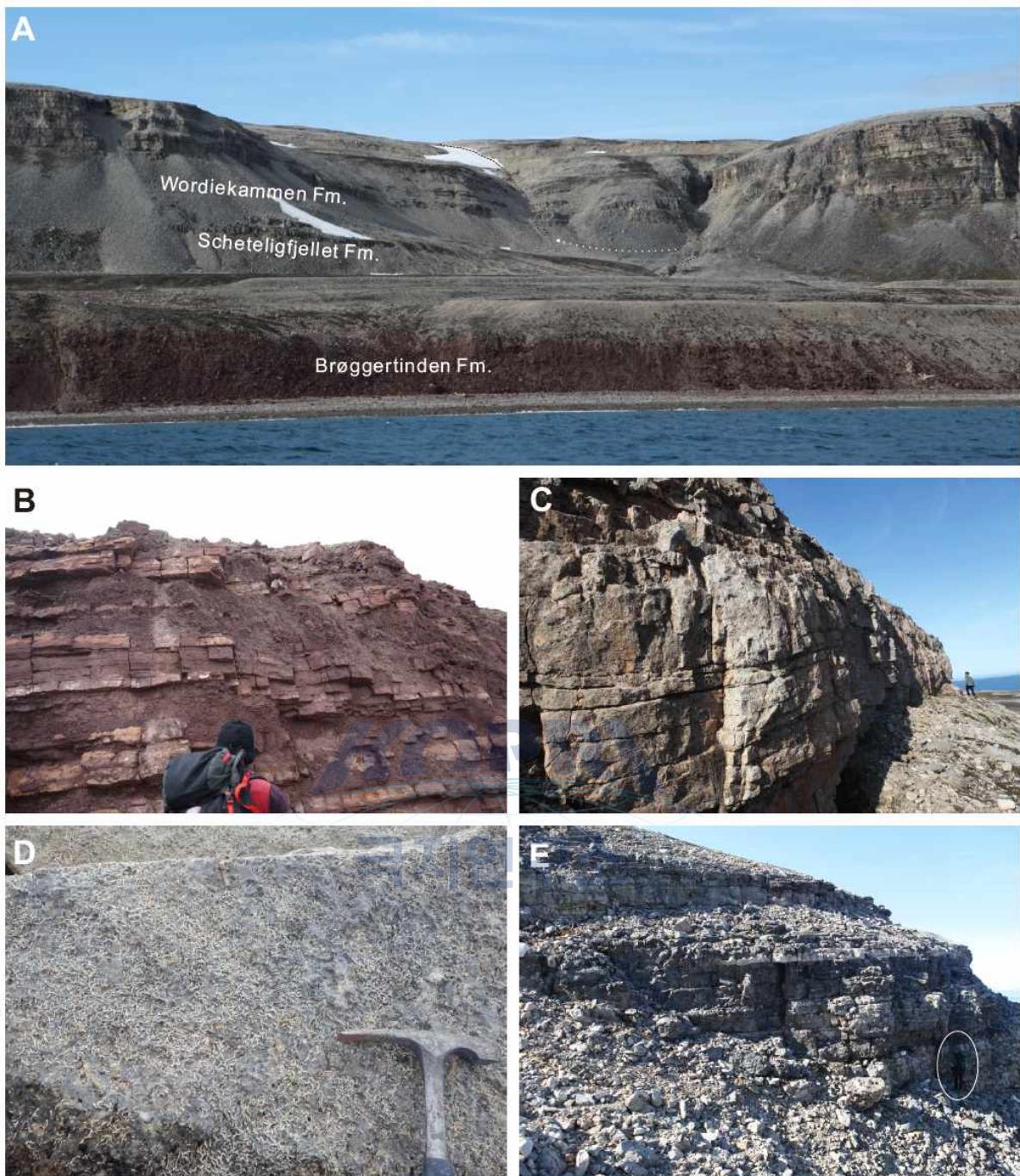


그림 3-9. 스탆베肯 단면. A, Overview of the Stupbekken section. B, Alternating red sandstone and mudstone of the Brøggertinden Formation. C. Skeletal limestone of the Scheteligfjellet Formation. D, Coral limestone of the Scheteligfjellet Formation. E, Lower part of the Mørebrean Member.

(4) 하부 셰텔리그피예렛(Lower Scheteligfjellet) 단면

셰텔리그피예렛은 다산기지 동쪽 약 4km에 위치한 봉우리로 다산기지 주변 후기고생대 지층을 특징짓는 스러스트단층이 남쪽 산면에 잘 노출되어 있다. 하부 셰텔리그피예렛 단면은 봉우리의 북쪽면을 따라 후기고생대지층을 노출하고 있다(그림 3-10). 노출 범위는 워디에카멘층

의 중부에서 깁슈肯층까지 연속적으로 드러나 있다. 워디에카멘층 하부는 변형없이 잘 보존되어 있지만, 상부는 구조변형으로 인해 습곡면이 노출되는 등 보존상태가 불량하다. 브뢰기반도의 후기고생대지층 중 워디에카멘층과 깁슈肯층의 경계부가 나타나는 유일한 단면중 하나로서 중요하다. 워디에카멘층 상부에는 엽리가 발달하는 백운암이 지배적으로 발달하며, 특징적인 우이드 석회암이 산출된다. 이 석회암의 우이드는 일반적인 우이드와 다르게 납작한 형태를 띠고 있다. 워디에카멘층의 엽리상 백운암은 두꺼운 석회각력암에 의해 피복되며 이경계면이 워디에카멘층과 깁슈肯층의 경계면으로 정의되었다.

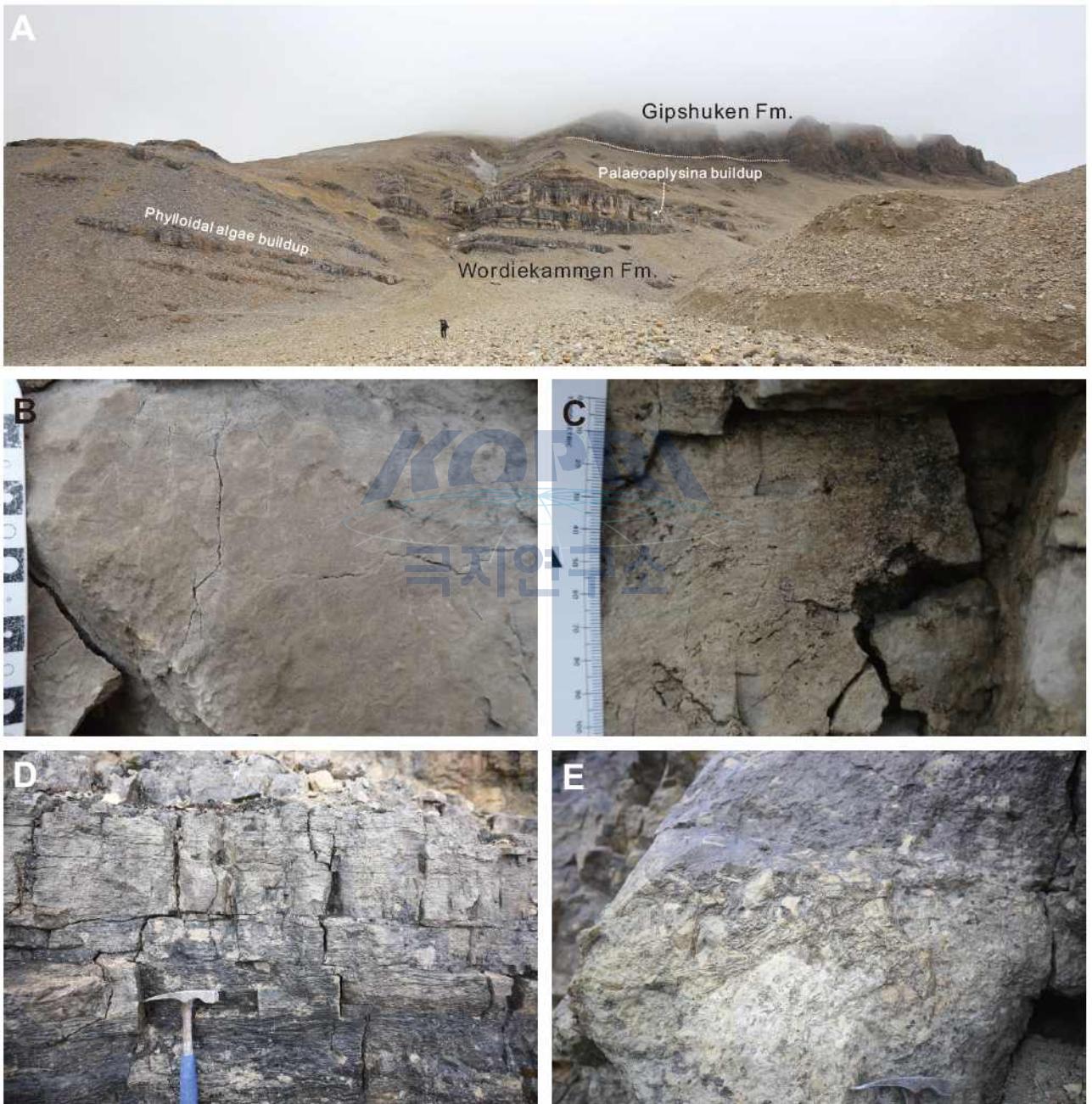


그림 3-10. 하부 셰텔리그피예렛 단면. A, Overview of the lower Scheteligfjellet section. B-C, Mørebreen Member. B, Phylloidal algae boundstone. C, Palaeoaplysina boundstone. D, Laminated dolomudstone of Tyrellfjellet Member. E, Breccia of the Gipshukken Member.

(5) 플라베켄(Flåbekken) 단면

플라베켄 지역은 다산기지에서 북서쪽으로 약 7.5 km 떨어진 곳에 위치해 있다. 하부 노두는 절벽으로 되어있어 접근할 수 없고 상부의 약 40 m 정도 두께의 노두가 접근이 가능하다(그림 3-11). 접근 가능한 노두의 최하부는 Scheteligfjellet, Strypbekken 그리고 Stupbekken 섹션에서도 발견된 약 4 m 두께의 phylloid algae build up 으로 시작한다. 섹션 상부는 약 4-5 m 두께의 매우 어두운 회색 빛을 띠는 백운암질이암 (dolo-mudstone) 베드 (bed)가 2매 나타나는 것이 특징적이다. 이 섹션에서는 유공충, 산호, 극피동물, 태형동물 그리고 조류 등의 화석이 다양하게 산출된다.

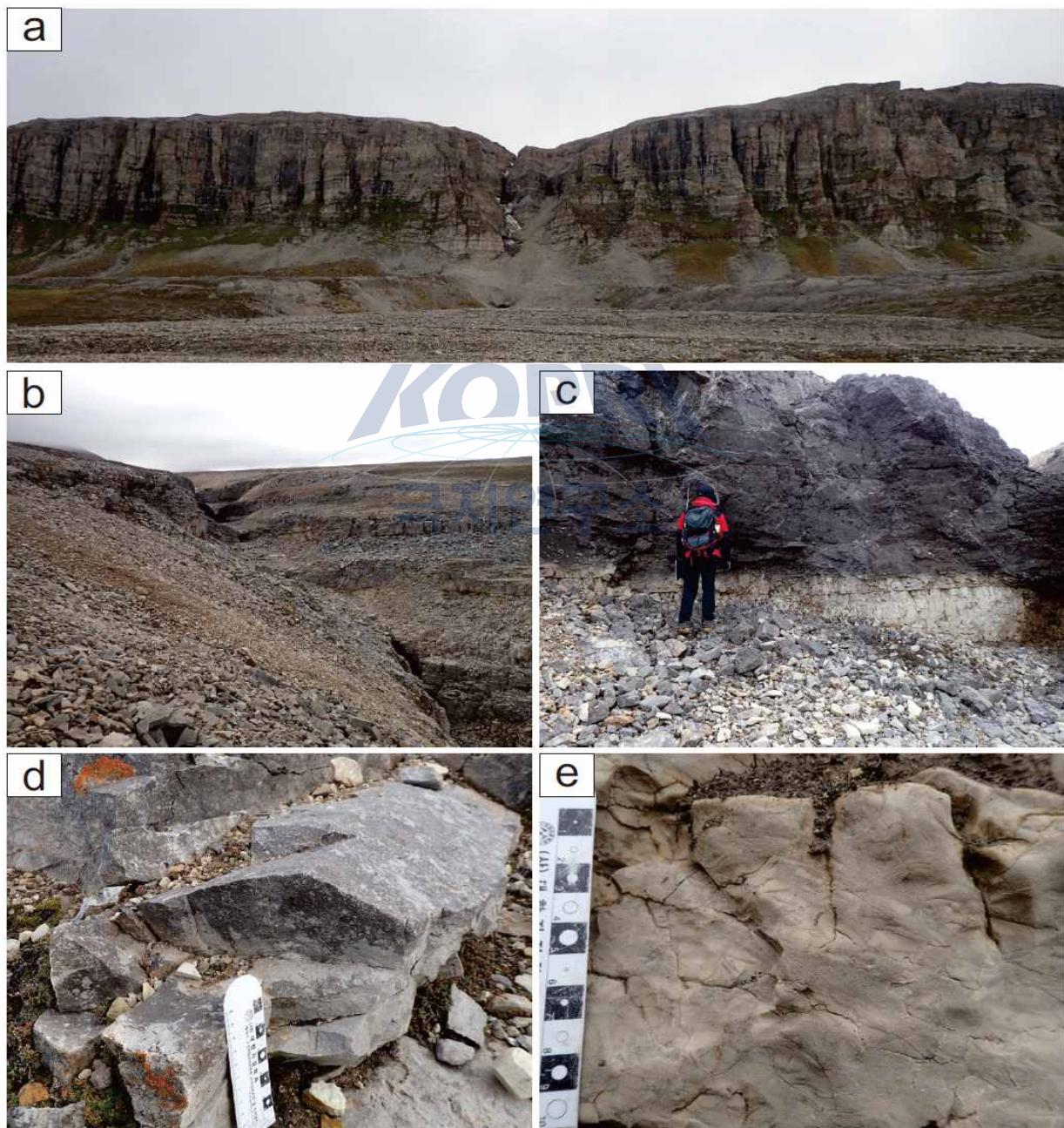


그림 3-11. (a) Flåbekken 섹션 전경 (b) 계단식으로 노출되어 있는 노두 모습 (c) 어두운 회색의 돌로머드스톤 (d) 망상으로 분포하는 마이크로코디움 (e) 필로이드 조류 (phylloid algae) 빌드업

(6) 상부 셰텔리그피예렛(Upper Scheteligfjellet) 단면

상부 셰텔리그피예렛 단면은 셰텔리그피예렛 봉우리 북쪽면에 발달한 뵈레브린빙하 상부에 위치해 있다. 단면에는 약 100 m 두께로 깁슈肯층과 캡스타로스틴층의 경계부가 노출되어 있다 (그림 3-12). 하부 깁슈肯층은 석회각력암과 엽리가 발달한 백운암, 작은 구멍(fenestrae)이 나 있는 백운암 등의 암상으로 이루어져 있다. 캡스타로스틴층의 최하부는 많은 완족동물 골격이 포함되어 있는 약 50 cm 두께의 석회암이 발달한다. 이 층은 스발바르 타지역의 캡스타로스틴 층 최하부에서도 나타나는 뵈링겐층원(Vøringen Member)과 대비되며 브뢰거반도에서는 처음 발견된 것으로 캡스타로스틴층의 발달과 이와 관련된 환경변화의 지역적 차이를 밝히기 위해 중요한 층이다. 최하부 뵈링겐층원 위에는 두꺼운 처트층이 연속적으로 발달한다.



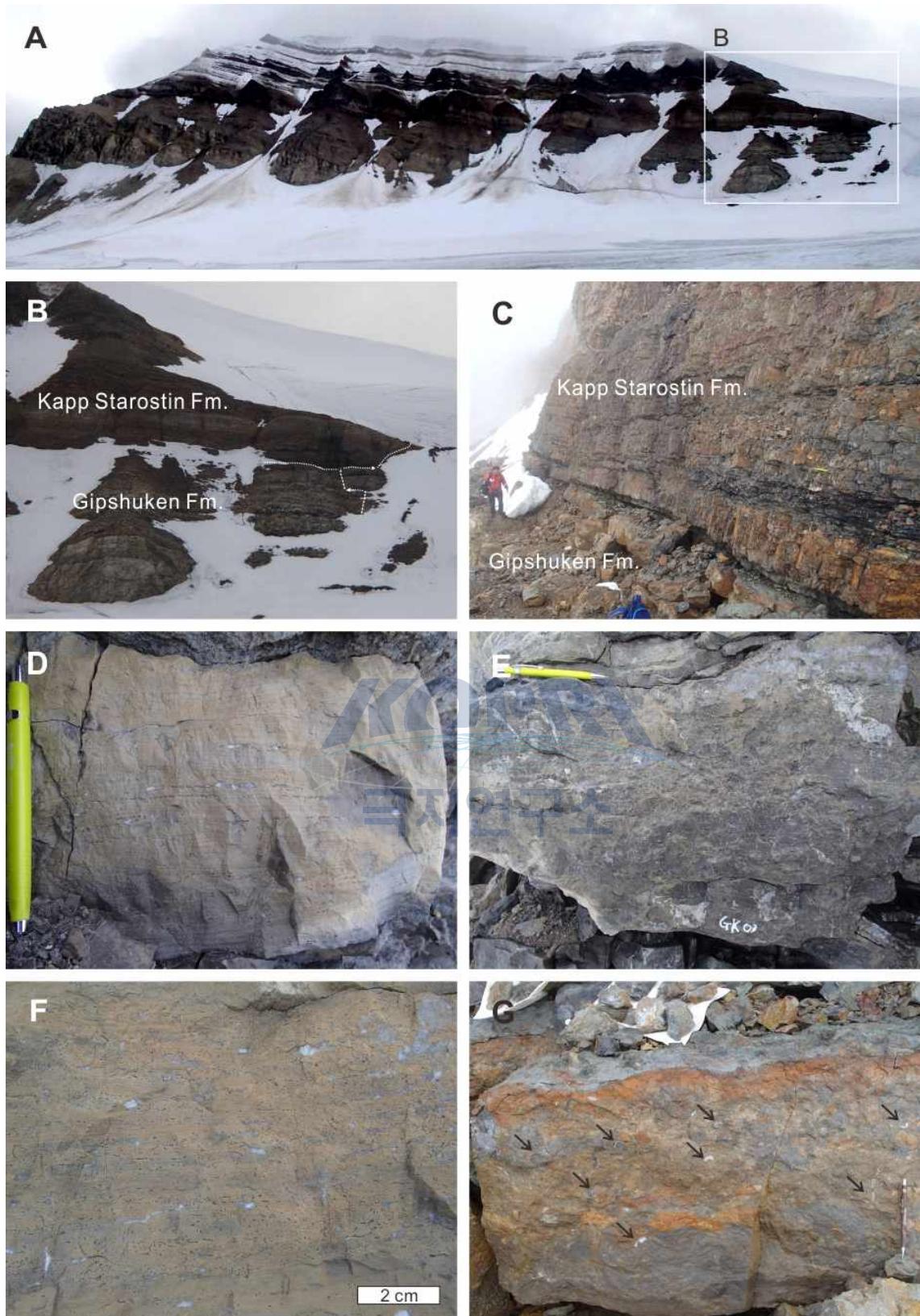


그림 3-12. A-B, Overview of the upper Scheteligfjellet section. C, The boundary between Gipshuken and Kapp Starostin formations. D-F, Lithofacies of Gipshuken Formation. D, Laminated dolomudstone with laminar fenestrae. E, Breccia. F, Fenestral dolomudstone. G, Siliceous skeletal limestone which is supposed to be an equivalent of the Vøringen Member, which yield characteristic brachiopods fauna (arrows).

(7) 스톨누텐(Stollnuten) 단면

스톨누텐단면은 서 브뢰기브린(Vest Brøggerbreen) 중 북쪽 지류 끝에 발달한 단면으로, 폐름기 캡스타로스틴층이 노출되어있으며, 이번 연구에서는 해당층의 하부만 제한적으로 조사되었다(그림 3-13). 최하부에는 괴상의 두꺼운 밝은색 쳇트층이 나타나며 조직이 다른 부분에 비해 치밀하지 않은 조직을 가지고 있다. 두꺼운 밝은 쳇트층 내부에 어두운색의 치밀한 쳇트 결핵체발달한다. 상위에 층진 규화된 석회암층이 발달하며 여기에서 다량의 완족류, 태형동물 화석이 발달한다. 또한 글루코나이트가 많이 포함된 얇은 사암층도 산출된다. 상위의 쳇트는 얇은 층이 잘 발달하고 있으며 생교란 흔적이 있는 흑색이암이 얕게 협재한다.



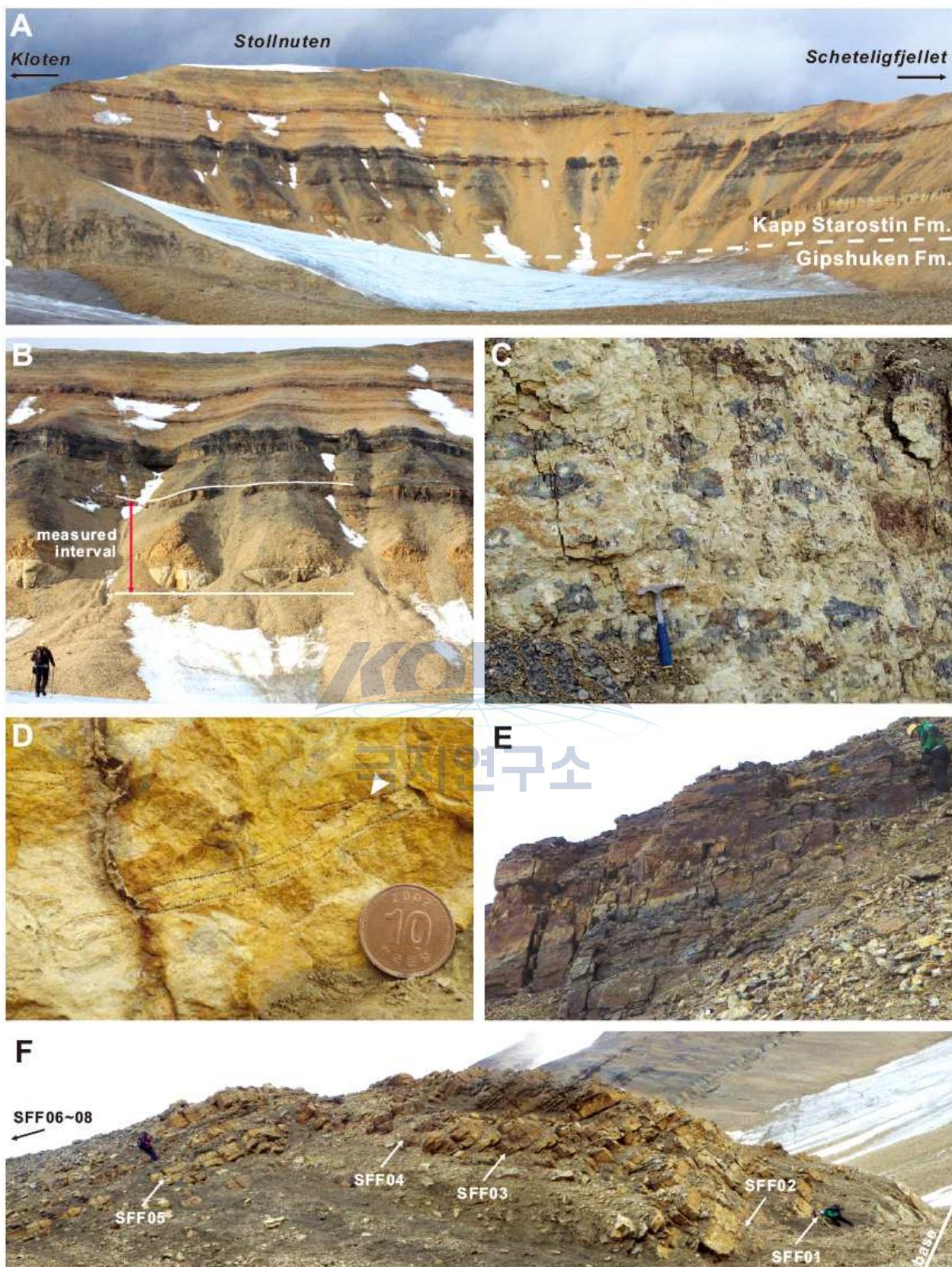


그림 3-13. A-B, Overview of the Stollnuten section. Only the lower part of the section was measured. C, Basal chert bed in Stollnuten section. This bed is composed of greenish white cherts with black chert nodules. D, Fossiliferous packstone bed with bryozoans (arrow). E, Dark colored bedded chert bed in the upper part of the measured interval. F, Lateral view of the Stollnuten section with fossil horizons.

라. 연대관련 자료

(1) Fusulinid

Stupbekken 단면과 Strypbekken 단면의 생층서 분석을 위한 fusulinid 시료를 채취하였다. 총 42점의 시료를 채취해 난징고생물지질연구소에서 박편제작 및 종감정을 수행하여 생층서 자료를 확보하였다(Dr. Yichun Zhang, 난징 고생물지질연구소). 연구지역에서 채취한 fusulinid는 모두 석탄기로서(그림 3-14, 그림 3-15) 기대했던 석탄기-폐름기 경계를 fusulinid로 인지하기는 어렵다는 결론을 내렸다. 획득한 생층서 자료를 바탕으로 스발바르 타지역의 동시대 지층과 대비에 활용할 예정이다.

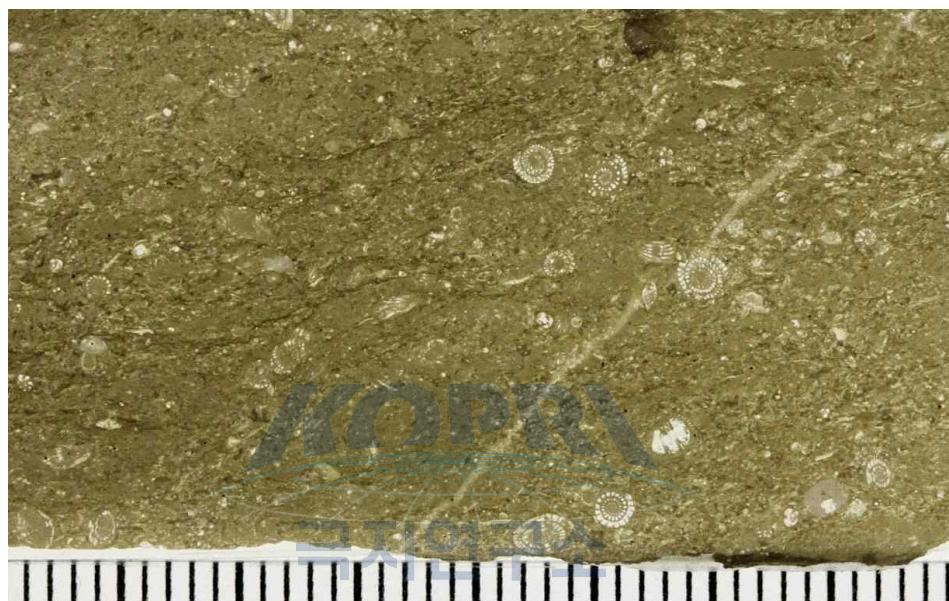


그림 3-14. 연구지역에서 산출되는 석탄기 fusulinid의 박편사진

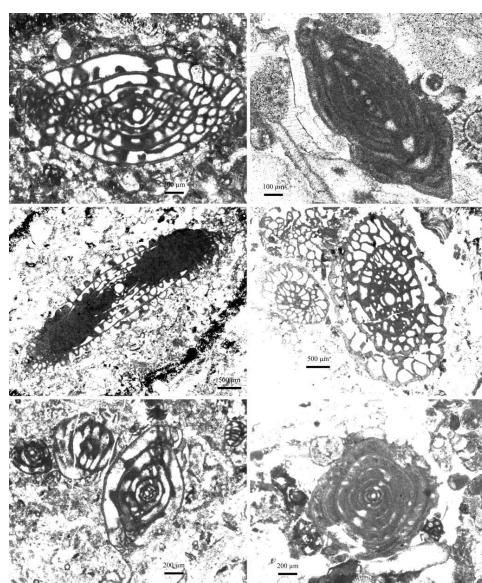


그림 3-15. 연구지역에서 산출되는 석탄기 fusulinid, 난징 고생물지질연구소 Dr. Y.C. Zhang.

(2) 저어콘연대자료

쇄설정 저어콘은 사암의 모래 입자에 포함된 저어콘으로서, 퇴적분지의 주변 기반암에서 기원한 것이다. 이 쇄설성 저어콘의 연대는 퇴적층의 연대를 제한해줄 뿐 아니라, 퇴적분지로 유입되는 퇴적물의 기원지에 대한 정보를 제공해준다. 이와 같은 연대 자료 확보를 위해 브뢰거 텐센트의 사암에서 쇄설성 저어콘을 분리하여 극지연구소 LA-ICP-MS를 이용 연대를 측정하였다(그림 3-16). 가장 짧은 저어콘의 연대는 423 Ma로 화석에 의해 제안되는 퇴적시기보다 충분히 오래된 연대이다. 저어콘의 분포는 450 Ma와 2700 Ma에 존재하는 작은 피크를 제외하고는 대부분이 800 Ma에서 2400 Ma 사이에 집중되어 있다. 이 사이에 1000 Ma와 1700 Ma 부근에 큰 피크가 있다. 이와 같은 분포는 이 지역 데본기이전 퇴적암의 쇄설성 저어콘 연대와 유사해, 이들이 재동되어 공급된 것으로 볼 수 있다(Gasser and Andresen, 2013). 2400 Ma 주변의 아키안 연대를 가지는 피크는 로렌시아에서 기원한 것으로 해석된다(Gasser and Andresen, 2013).

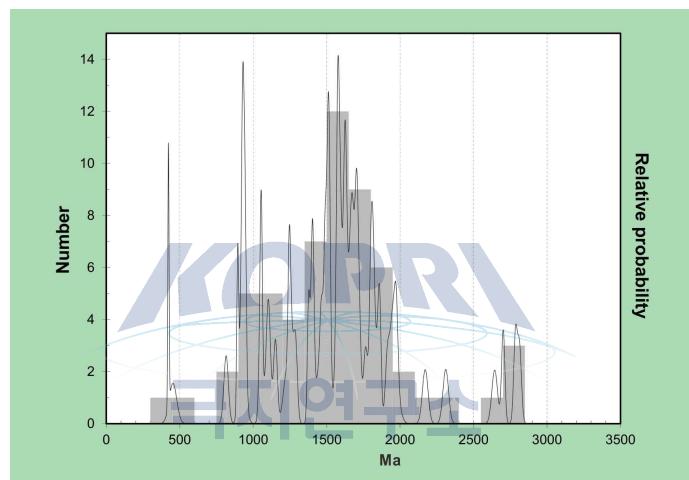


그림 3-16. Broggertinden Formation 쇄설성저어콘 연대 분포

마. 층서 재정의

위 주요 단면에서 작성한 주상도(그림 3-17)와 암석시료를 바탕으로 한 정밀한 암상 구분을 통해 후기고생대 층서단위의 층경계를 재정의 했다. 아래 층서표에 표시된 층경계 5곳을 재정의하고 주상도를 작성하였으며 이에 대한 암층서 재정리 논문을 작성 중이다.

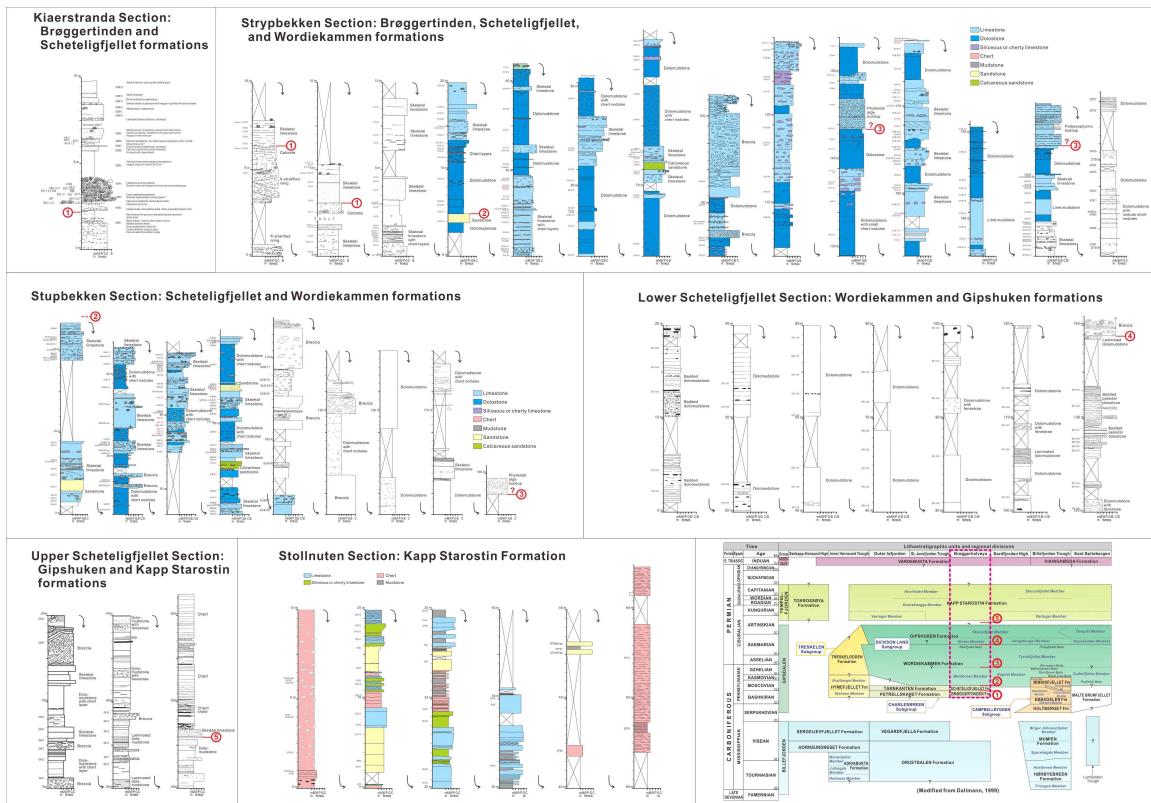


그림 3-17. 본 과제에서 연구한 주요 단면에서 작성한 정밀 주상도



- ① Brøggertinden-Scheteligfjellet 층 경계: 규산염 쇄설성 퇴적물 위에 놓이는 탄산염이라는 정의를 유지한채, 층경계의 특성으로 토양화와 관련된 석회질 결핵체를 추가
- ② Scheteligfjellet-Wordiekammen 층 경계: 두 가지 정의가 공존함. 첫 번째는 하부부터 나타나는 사암이 마지막으로 산출되는 곳, 두 번째는 두꺼운 백운암이 처음 나타나는 곳. 정밀 조사 결과 두꺼운 백운암이 처음 나타나는 곳 상위에 얇은 사암층이 드물게 산출되므로, 두꺼운 백운암이 처음 나타나는 곳을 층경계로 새로 정함
- ③ Morebreen-Tyrellfjellet 층원 경계: 경계가 원래 정의된 곳에서 가장 중요한 키가 되는 Brucebyen Bed가 나타나지 않기 때문에 가장 문제가 됨. Brucebyen Bed와 비슷한 위치에 산출되면서 브뢰기반도 지역 여러 단면에서 잘 대비되어 나타나는 흑색 석회이암의 하부를 층원 경계로 정의.
- ④ Wordiekammen-Gipshukken 층 경계: 이 지역에서 드물게 노출되는 경계부임. Gipshukken 층에 잘 발달하는 각력암이 두껍게 처음 나타나는 곳에 층 경계 설정. 이 하부에도 Gipshukken 층에 나타나는 엽리 돌로마이트 등이 나타나지만 이는 하부의 Tyrellfjellet 층원에 포함시켜 Morebreen 층원과 뚜렷이 구별되도록 함.
- ⑤ Gipshukken-Kapp Starostin 층 경계: 이 지역에서 최초로 인지한 층경계. 스발바르 전역에 Voringen 층원의 하부를 층경계로 삼지만, 브뢰기반도에서는 지금까지 보고되지 않음. 2015년에 발견한 Voringen 층원을 바탕으로 이를 층경계로 정의.

2. 다산기지주변 후기고생대 퇴적상

다산기지주변 고생대 퇴적층 중 집중적인 조사가 이루어진 브뢰거틴텐, 셰텔리그피예렛층과 워디에카멘층의 퇴적상을 분석하였다. 현장에서 퇴적구조와 입자의 종류 조직을 구분한 암상을 바탕으로 박편관찰을 통해 세부적인 조직을 수정하였으며 이를 정리하여 표 3.3-1에 정리하였다. 모두 19개의 퇴적상이 구분되었으며 이중 4개가 규산염쇄설성 퇴적상, 13개가 탄산염 퇴적상, 1개는 처트 퇴적상이다. 마지막 한 퇴적상은 탄산염 퇴적상에 덧씌워진 마이크로코디움 퇴적상이다. 추가로 스트립베켄, 스크립베켄 단면에 대한 현미퇴적상 분석(그림 3-18, 그림 3-19)을 통한 석회암 구성입자들의 특성을 바탕으로 세분하는 작업이 추가적으로 이루어져야 한다. 기본적인 퇴적상 분석과 함께 특징적으로 나타나는 석회암 구성요소들 중 온코이드에 대한 자세한 분석을 실시하였다.

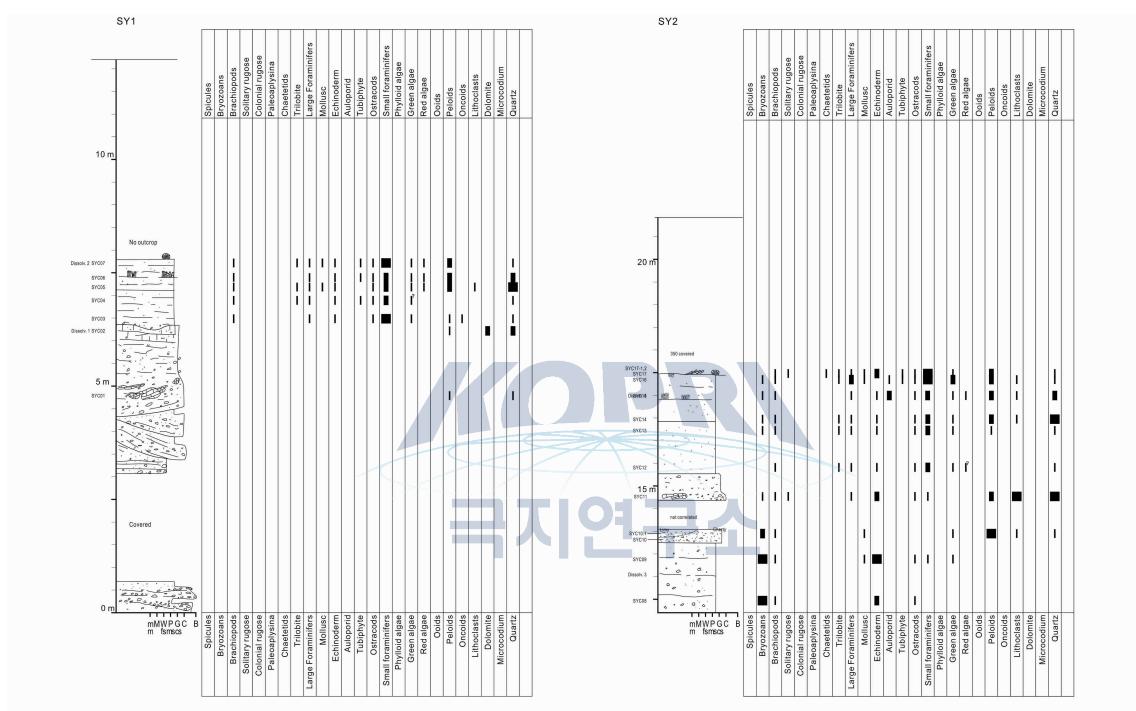


표 3-1. 다산기지 주변 후기고생대 층에서 구분한 퇴적상과 퇴적환경

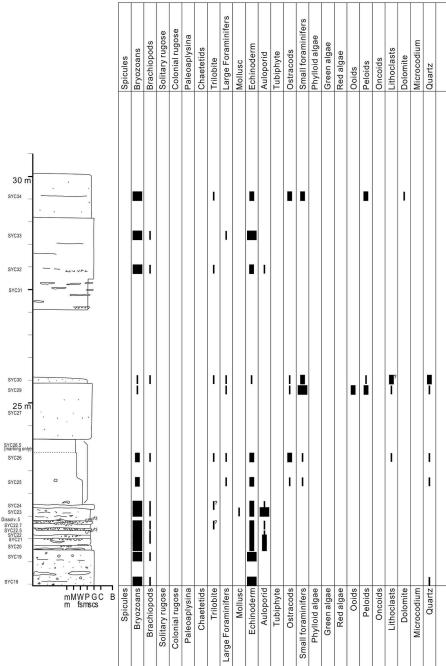
Siliciclastic facies		
Reddish mudstone (Mr)	Reddish homogeneous mudstone frequently with pedogenic structures	Flood plain
Stratified sandstone (Ss)	Horizontal or cross stratified sandstone; tabular or trough-cross bedded	Fluvial channel-fill
Massive sandstone (Sm)	Sandstone without distinct sedimentary structures; commonly calcareous	Coast
Stratified conglomerate (Cs)	Pebbly conglomerate with planar or trough-cross bedding	Fluvial channel-fill
Carbonate and chert facies		
Calcareous shale (CS)	Homogeneous; greenish gray; thin inter bed between limestone beds	Offshore
Lime mudstone (LM)	Homogeneous; nodular texture in part; gray to black in color	Deep platform or lagoon
Skeletal wackestone (Ws)	Bryozoan, green algae, coral, brachiopods floated in muddy matrix	Lagoon
Skeletal pack-grainstone (P-Gs)	Bryozoan, green algae, coral, brachiopods stacked with certain amounts muddy matrix	Shallow platform
Skeletal grainstone (Gs)	Skeletal fragments without muddy matrix	Shallow platform or bank
Peloidal grainstone (Gp)	Peloidal fragments without muddy matrix	Shallow platform or bank
Breccia (B)	Limestone and dolostone breccia with disorganized fabric; buckled structures in part; sedimentary structures in matrix	Dissolution collapse breccia
Palaeoaplysina boundstone (BOpa)	Buildup made by stacking of Palaeoaplysina; muddy matrix	Shallow marine buildup
Phylloidal alga boundstone (BOph)	Buildup made by stacking of phylloidal algae; typical "pockets" of muddy matrix in the curved surface of the algae	Shallow marine buildup
Coral boundstone (BOco)	Large buildup made of combination of rugose coral and chatetids; low relief multithecopora and aulopora corals	Buildup on the initially flooded platform
Dolomudstone (DM)	Homogeneous light gray dolomudstone with common chert nodules and layers; remnant of original allochems observed in part	Dolomitized limestone
Laminated dolomudstone (DMI)	Finely laminated dolomudstone with common fenestrae willed with sparry cements	Inter- to supratidal microbial laminites
Homogeneous chert (CHh)	Unbedded homogeneous chert; bearing chert nodules with different color	Deep cold platform
Bedded chert (CHb)	Bedded homogeneous chert; thin to medium bedded	Deep cold platform
Microcodium-overprinted facies (-M)	Various carbonate facies with microcodium overprint	Overprint of subaerial exposure

가. 현미퇴적상 분석

세텔리그피예렛층과 워디에카멘층에 대한 현미퇴적상 분석을 실시하였다. 주요한 석회암의 구성입자와 퇴적환경을 잘 지시하는 입자들을 대상으로 현미경관찰을 통해 네 단계로 정성적인 함량을 기록하였다. 기준이 되는 입자의 종류는 spicules, bryozoans, brachiopods, solitary rugose, colonial rugose, paleoaplysina, chaetetids, trilobite, large foraminifers, mollusc, echinoderm, auloporid, tubiphyte, ostracods, small foraminifers, phylloid algae, green algae, red algae, ooids, peloids, oncoids, lithoclasts, dolomite, microcodium, quartz 의 25를 설정했다. 대부분은 후기고생대 탄산염의 대표적인 탄산염 생물군이 포함되었으며, 해수면 노출의 흔적으로 여겨지는 microcodium, 쇄설성입자의 유입을 나타내는 quartz를 설정하였다.



SY3



SY4

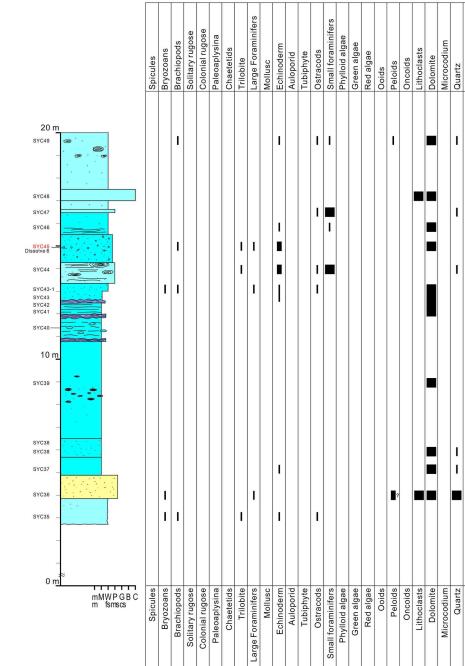
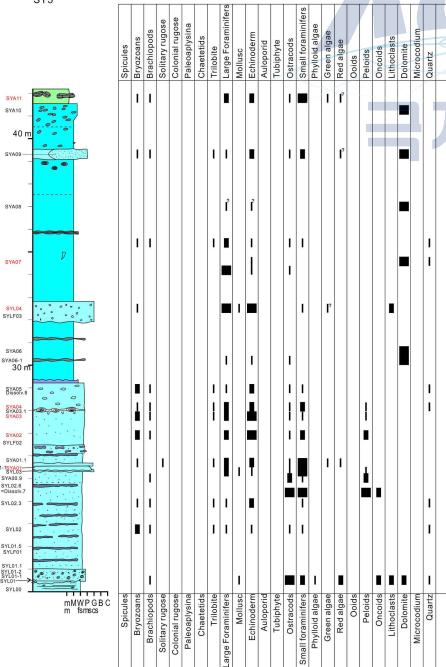


그림 3-18(계속). 스트립베큰 단면의 현미퇴적상분석 결과 (3, 4)

SY5



SY6

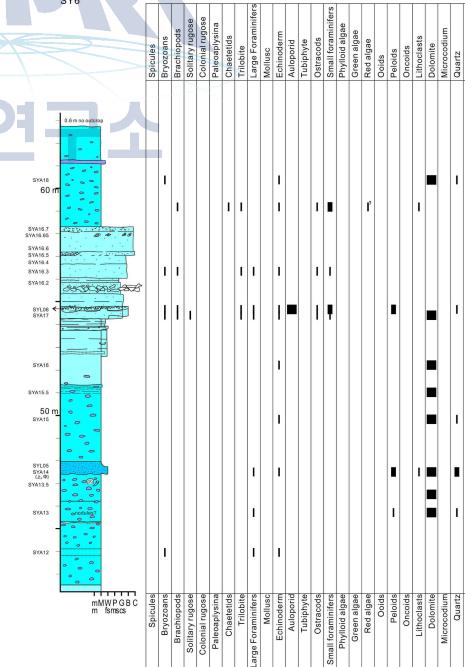


그림 3-18(계속). 스트립베큰 단면의 현미퇴적상분석 결과 (5, 6)

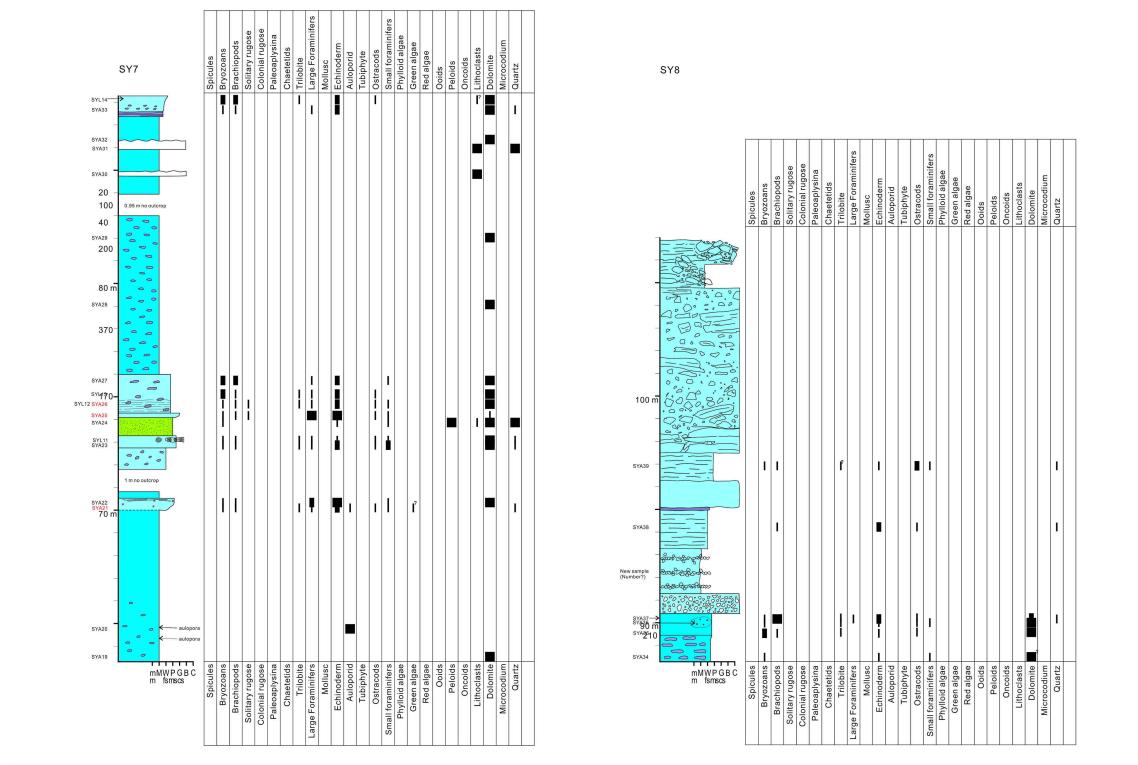


그림 3-18(계속). 스트립베肯 단면의 현미퇴적상분석 결과 (7, 8)

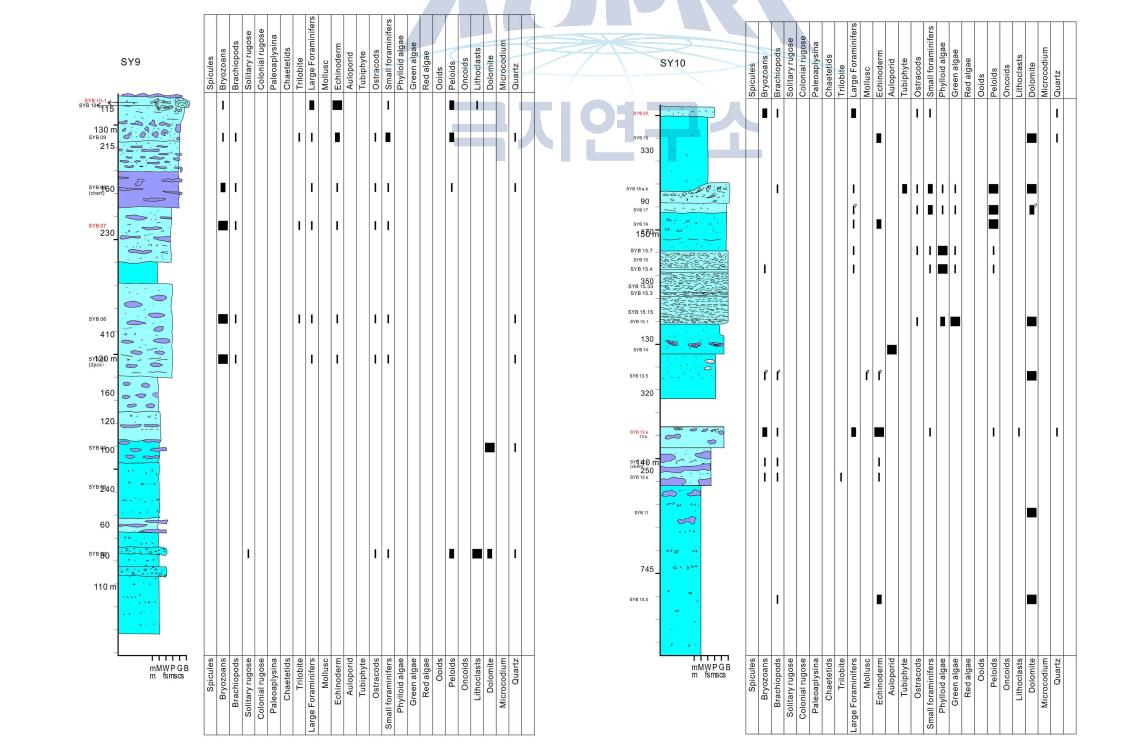


그림 3-18(계속). 스트립베肯 단면의 현미퇴적상분석 결과 (9, 10)

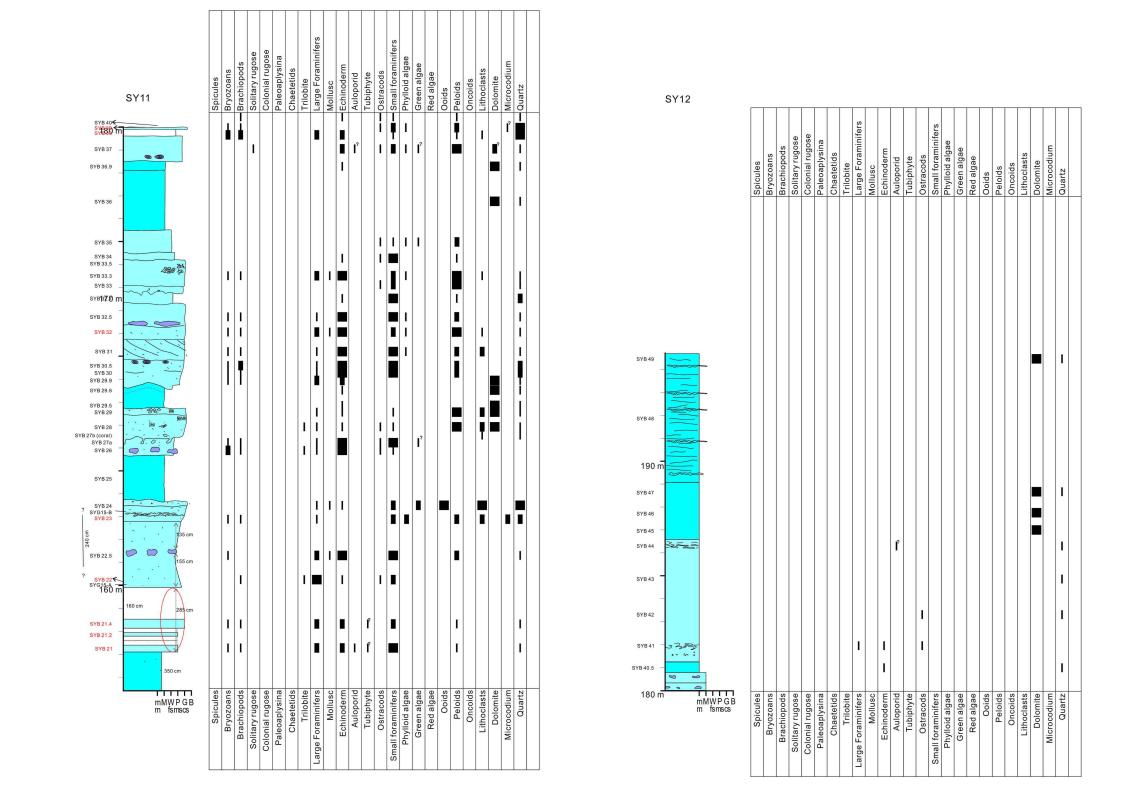


그림 3-18(계속). 스트립베肯 단면의 현미퇴적상분석 결과 (11, 12)

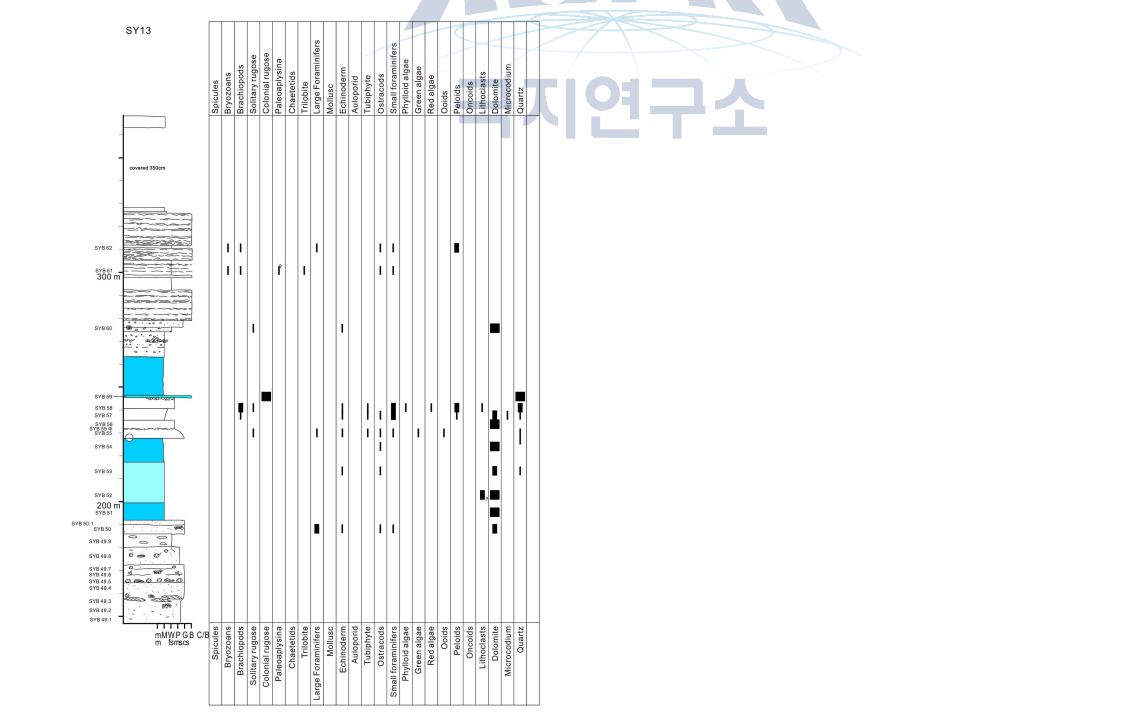


그림 3-18(계속). 스트립베肯 단면의 현미퇴적상분석 결과 (13)

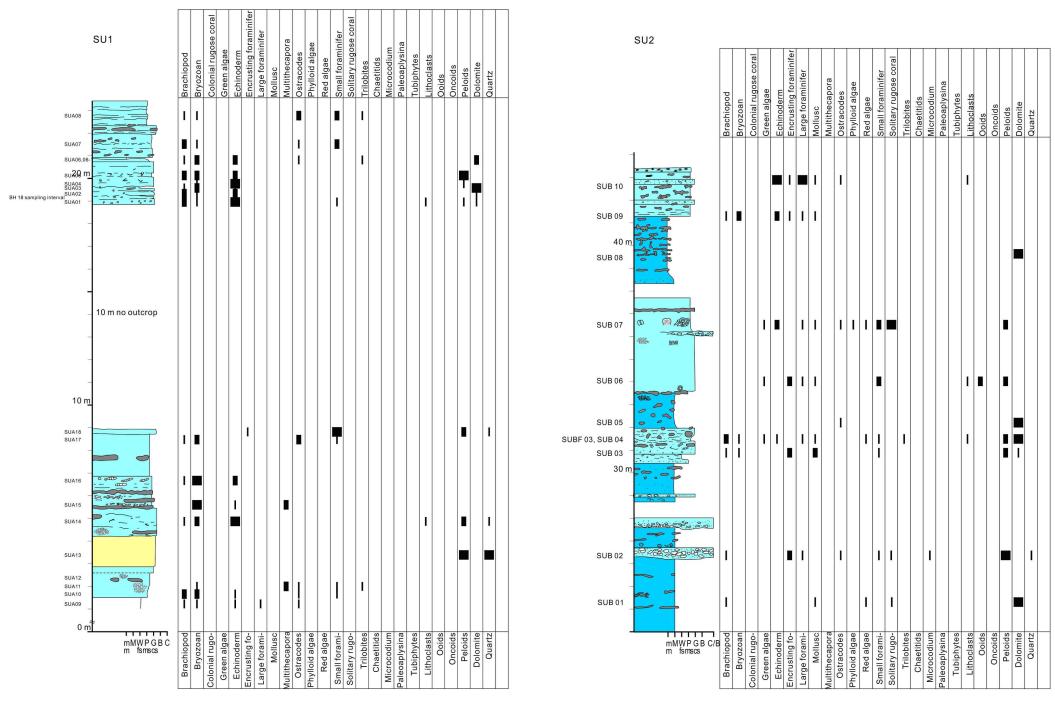


그림 3-19. 스탑베肯 단면의 현미퇴적상분석 결과 (1, 2)

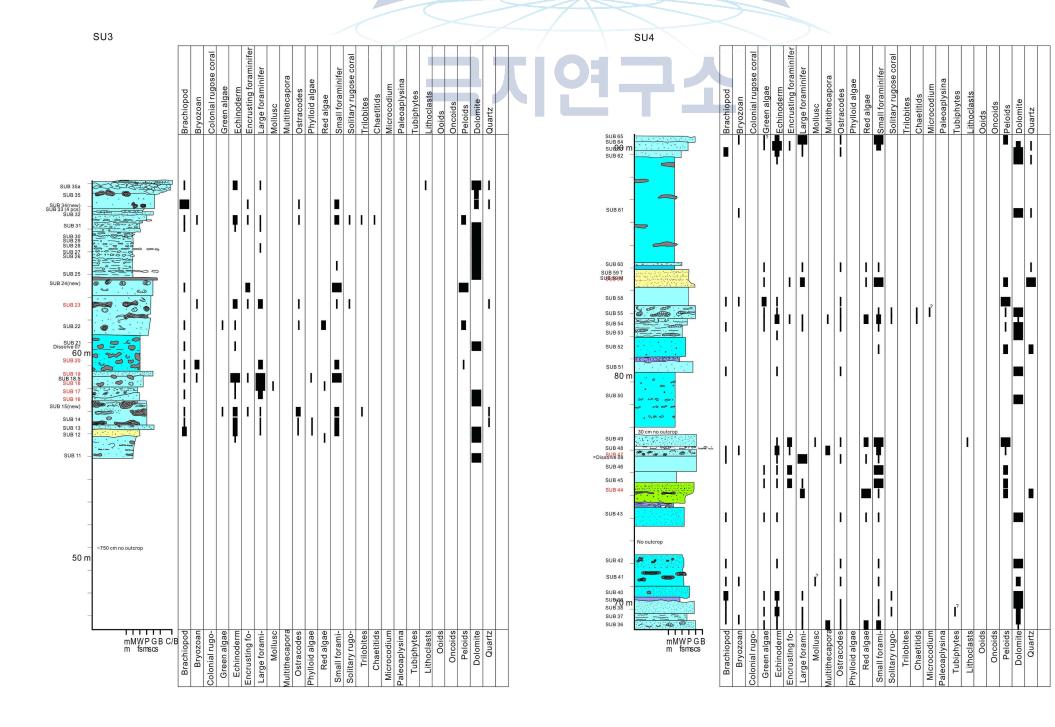


그림 3-19(계속). 스트립베肯 단면의 현미퇴적상분석 결과 (3, 4)

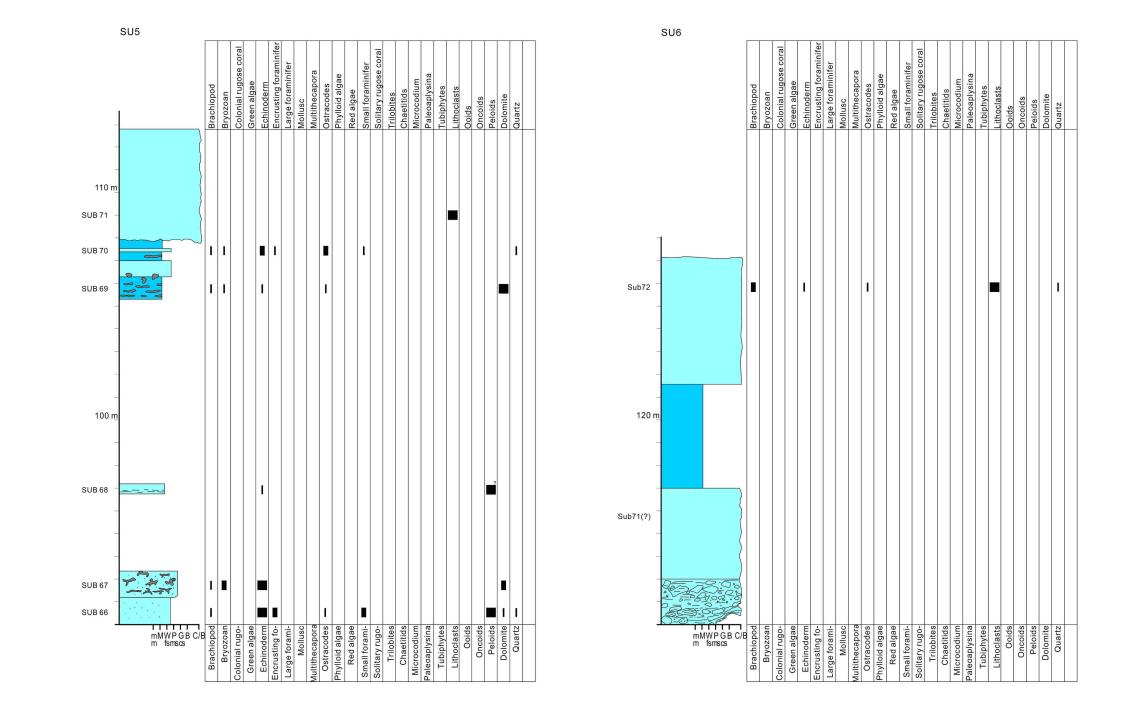


그림 3-19(계속). 스트립베肯 단면의 현미퇴적상분석 결과 (5, 6)

나. 온코이드(oncoid) 퇴적상

(1) 온코이드의 분포 및 형태

온코이드는 후기 석탄기-페름기의 워디에카멘 층 (Wordiekammen Formation)의 하부에서 산출 되었다(그림 3-20). 층의 하부가 노출되어 있는 Stupbekken 지역과 Strypbekken 지역에서 온코이드를 포함하고 있는 수 cm - 수십 cm 두께의 베드(beds)가 발견되었다. 온코이드는 원형에서 타원형으로 나타나며 지름이 2 cm 미만인 메소-온코이드 (meso-oncoid)와 2 cm - 7 cm 지름의 매크로이드 (macroid)가 발견되었다.

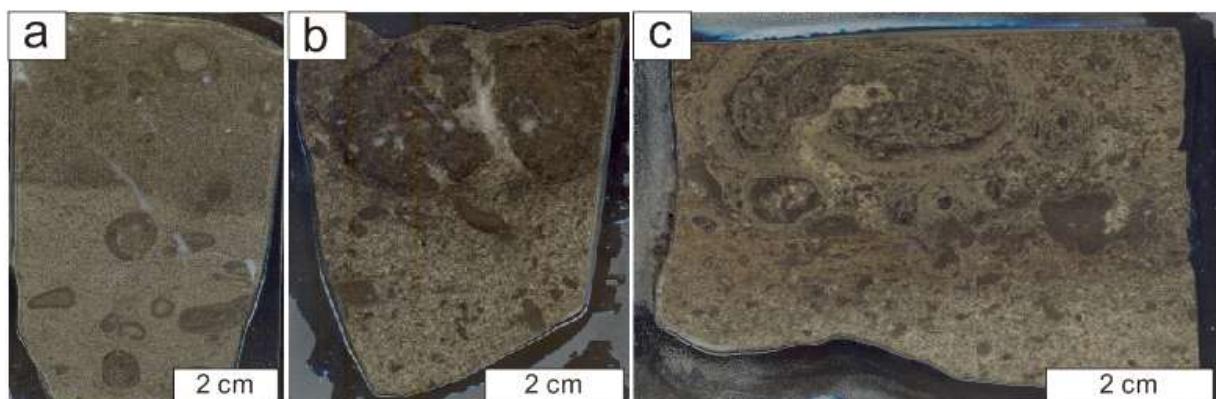


그림 3-20. 온코이드 슬랩 스캔 이미지. (a) 원형 내지 타원형의 메소-온코이드 (Strypbekken 지역에서 산출) (b) 타원형의 매크로이드 (Stupbekken 지역에서 산출) (c) 피질이 잘 발달된 매크로이드와 메소-온코이드 (Stupbekken 지역에서 산출)

(2) 온코이드의 구성 생물

○ 유공충 (foraminifera, *Palaeonubecularia*) : 온코이드 피질 (cortex)를 이루고 있는 주요 생물로 얇은 관의 형태로 나타난다. 얇은 관은 두꺼운 미크라이트질 막 (micritic wall)을 갖는 것이 특징적이며 넓은 범위의 지름 (20–100 μm)을 갖는다. 다른 생물이나 자신의 표면에 붙고, 덮으면서 온코이드의 피질을 형성한다(그림 3-21).

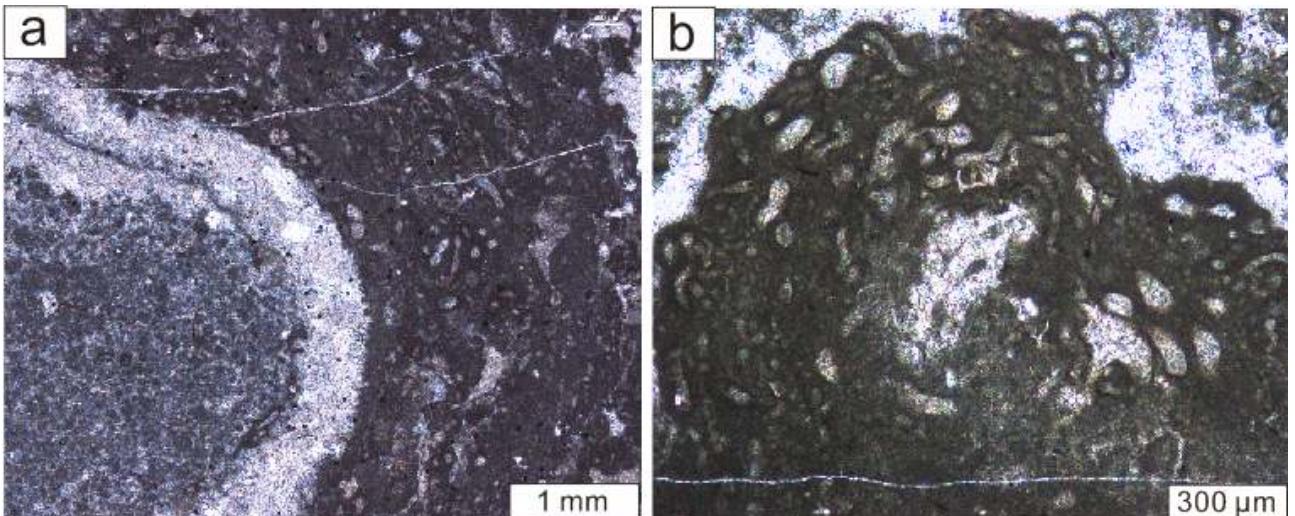


그림 3-21. 유공충의 현미경 사진. (a) 해 (녹조류)의 표면을 감싸며 붙어 있는 *Palaeonubeculariid* 유공충. (b) 서로의 표면에 붙어 자란 유공충. 유공충은 다양한 크기의 지름을 갖는 관의 형태로 나타난다.

○ 탄산염 미생물 (calci-microbe) : 온코이드 피질을 이루고 있는 또 하나의 주 구성 생물로 방사상의 실처럼 가는 관의 군집으로 관찰된다. 보존이 잘 되지 않은 경우에는 가는 관이 희미하거나 잘 보이지 않으며 흔히 펠로이드 (peloid)와 미크라이트 (micrite)와 함께 나타난다 (그림 3-22).

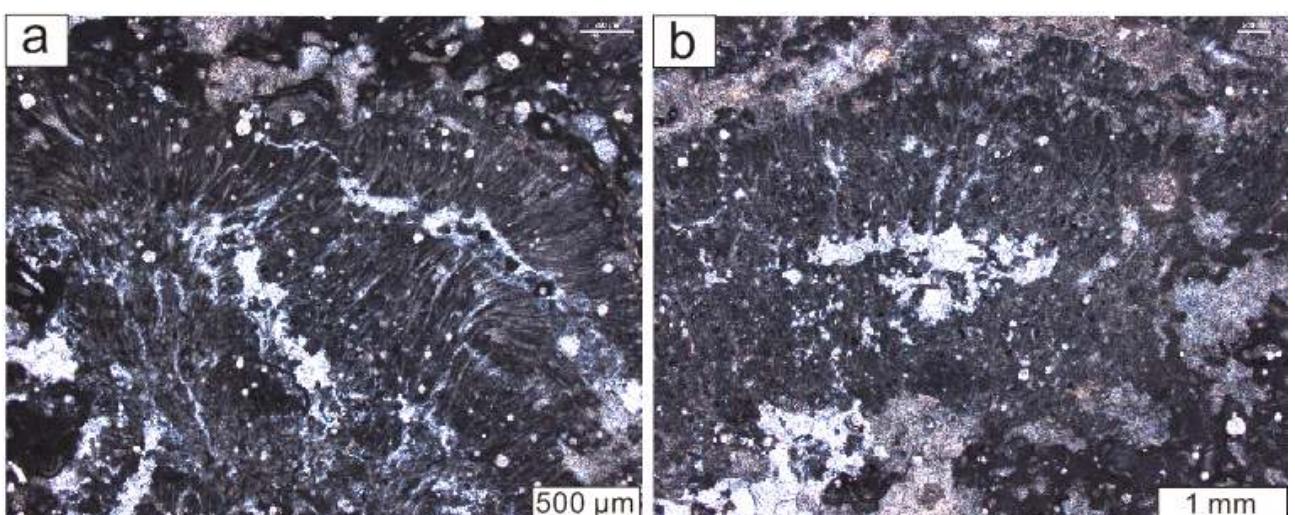


그림 3-22. 탄산염 미생물의 현미경사진. (a) 방사상으로 뻗는 얇은 관들의 군집이 잘 관찰 된다. 탄산염 미생물의 표면을 유공충과 조류 등이 덮고 있다. (b) 얇은 관들이 희미하게 보이며 주로 필로이드들과 함께 관찰된다.

○ 조류 (algae) : 얇은 층상 혹은 판상의 적조류 (*Archaeolithophyllum?*)와 가지 상으로 뻗는 판의 군집으로 관찰되는 녹조류 (*Nansenella?*)가 온코이드 피질에서 흔하게 발견된다. 대부분의 온코이드는 녹조류의 조각을 핵으로 갖고 있다(그림 3-23).

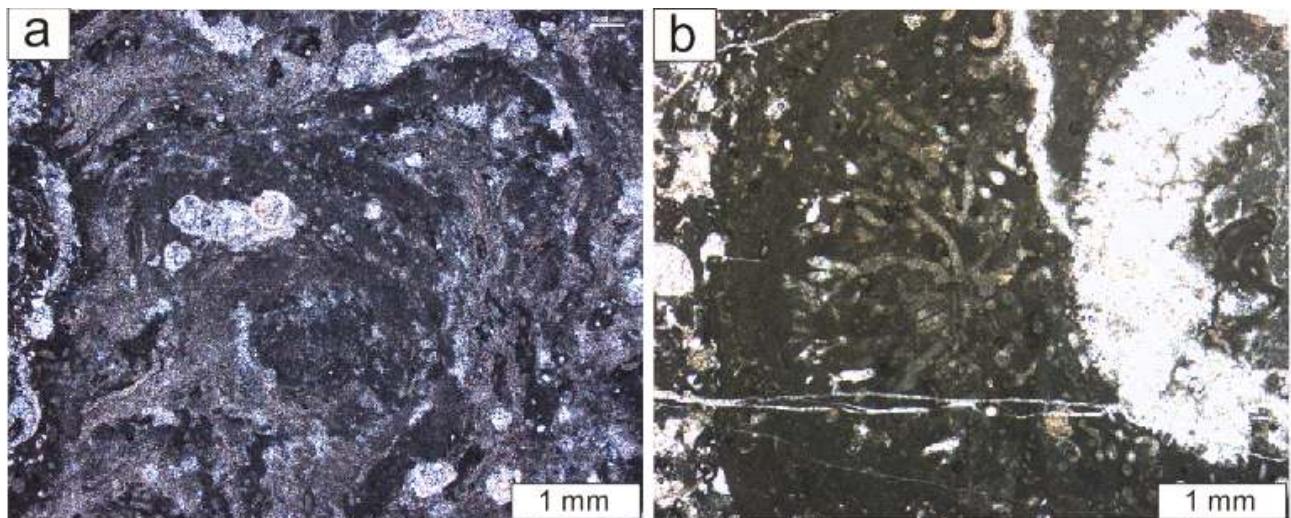


그림 3-23. 조류의 현미경 사진 (a) 불규칙하거나 층상의 적조류 (*Archaeolithophyllum?*)가 미크라이트와 유공충 혹은 자신의 표면을 감싸며 온코이드의 피질을 형성하고 있다. (b) 온코이드 피질 내에 녹조류 (*Nansenella?*) 군집. 이들은 가지 상으로 뻗어 나가며 군집을 이루는 것이 특징이다.

(3) 온코이드의 주변상 및 형성 환경

온코이드 주변상 (surrounding facies)은 주로 작은 유공충과 개형충으로 이루어져 있으며 생물 다양성이 매우 낮은 것이 특징적이다(그림 3-24). 낮은 생물 다양성은 일반적으로 높은 염도 등과 같은 환경적인 스트레스 (environmental-stress)가 높음을 의미한다. 이와 유사한 퇴적물은 스피츠베르겐 지역에서 탄산염 완사면 안쪽 (Inner carbonate ramp) 의 제한된 석호환경 (restricted lagoon) 등으로 해석되어 왔다 (Hüneke et al., 2001, Blomeier et al., 2009, Ahlborn & Stemmerik., 2015). 또한 온코이드의 구성 생물인 유공충, 녹조류와 탄산염 미생물은 후기 고생대의 얇은 바다 환경에서 서식하던 대표적인 생물이며 이들은 높은 환경적인 스트레스 하에서도 생존할 수 있다고 알려져 있어 기존의 해석을 온코이드의 구성 생물들도 뒷받침 해주고 있다. 주변상의 퇴적 조직 (sedimentary texture)은 와케암 (wackestone)에서 입자암 (grainstone) 까지 다양하게 나타나며 와케암과 팩암 (packstone)에서는 메소-온코이드가 주로 관찰되며, 입자암에서는 매크로이드가 우세하게 나타난다. 이는 온코이드의 크기 및 형태가 에너지의 영향을 받았음을 의미한다 (Flügel, 2004).

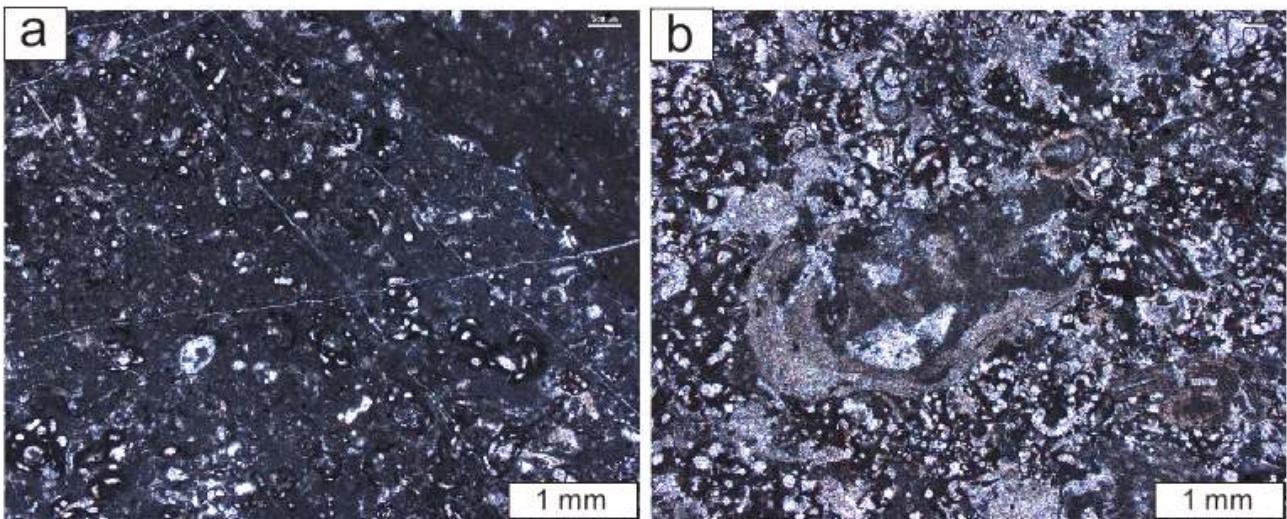


그림 3-24. 온코이드 주변상의 현미경 사진. (a) 작은 유공충들과 개형충으로 이루어진 와케암. (b) 작은 유공충들과 개형충, 온코이드의 파편, 우이드 (ooid)등으로 이루어진 입자암. (a)에 비해 상대적으로 높은 에너지 환경에서 퇴적되었음을 지시한다.

(4) 의의

온코이드는 과거 퇴적 환경 해석하는데 중요한 정보를 담고 있는 것으로 여겨져 왔지만 스발바르 후기 고생대의 퇴적학적 연구에서는 간과되어 왔다. 스발바르에서 온코이드의 존재가 언급된 적이 있지만 자세한 연구는 수행되지 않았다 (Lønøy, 1995; Stemmerik & Worsley, 2000). 온코이드의 구성생물과 주변상에 대한 종합적인 연구는 과거 퇴적 환경을 더 자세히 이해하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

극지연구소

3. 다산기지주변 후기고생대 완족동물의 다양성과 진화

가. 완족류 화석군의 계통 분석

완족동물화석은 연구팀이 다산기지 주변 퇴적암에 대한 현장조사를 시작할 때 가장 중요하게 생각했던 동물군이다. 일본-노르웨이 공동 연구팀이 1980년대 수행한 현장조사에서 채집한 완족동물 화석을 바탕으로 층서와 고생물에 대한 연구를 선행해서 수행해왔기 때문이다. 후기 고생대의 가장 대표적인 완족동물 화석그룹 중의 하나인 Spiriferoidea의 진화를 이해하기 위하여, 이 그룹 내 22개 속(genus)들에 대한 계통 분석이 분지계통분석법(cladistics)과 Bayesian 분석법을 이용하여 최초로 실시하였다. 그 결과, 지금까지 제안된 이 그룹에 대한 고전적 분류체계가 이들의 실제 계통과는 상당한 차이가 있다는 것이 확인되었다.

특히, 아래 그림 3-25에서 보는 바와 같이, 현재 분류체계상 Spiriferoidea내 각 목(family)들의 속들은 복원된 계통도 상에서 단일 계통(monophyly)을 형성하지 않음이 확인되었다. 그림 0000 의 우측 가장자리에서, 같은 색깔 및 알파벳으로 표기된 속들은 같은 목에 해당한다.

이 연구결과는 이 완족동물 그룹의 계통관계에 대한 새로운 이해와 더불어, 완족동물 계통 분석에 중요한 형태적 특징들에 대한 재고가 필요함을 시사한다.

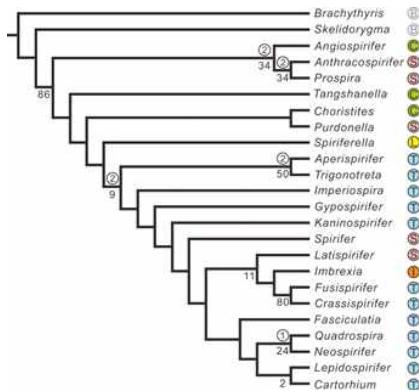


그림 3-25. 분지계통 분석법을 이용한 완족동물 Spiriferoidea내 속들의 계통관계 복원도

나. 완족류 화석의 수렴진화

폐름기(약 3억에서 2억5천년전) 시대의 완족동물 중 상당수의 종(species)이나 속(genus)들은 과거 고지리상 양쪽 반구(북반구와 남반구) 모두의 중위도(혹은 고위도)에만 (저위도 지역에는 살지 않으면서) 분포했던 것으로 알려진다. 이와 같은 분포를 가진 것으로 알려진 완족동물 4개 속들에 대해 동정과 상세한 형태분석, 고생지리 분석 및 연관된 그룹들과의 계통 분석 실시하였다.

계통적으로 깊이 연관되었다고 생각된 완족동물들이, 사실은 서로 다른 지역에서 비슷한 형태적 특징을 획득하게 되었다는 것을 규명하였다. 아래 그림3-26에서 보는 바와 같이, 각 완족동물 속들은 폐름기 동안의 복잡한 고지리적 변화를 통해 오직 한 반구(북반구 또는 남반구)의 중위도 지역에만 고립되었으나, 서로 비슷한 환경(기후)하에서 수렴진화를 통해 유사한 형태를 갖춘 것이 확인되었다.

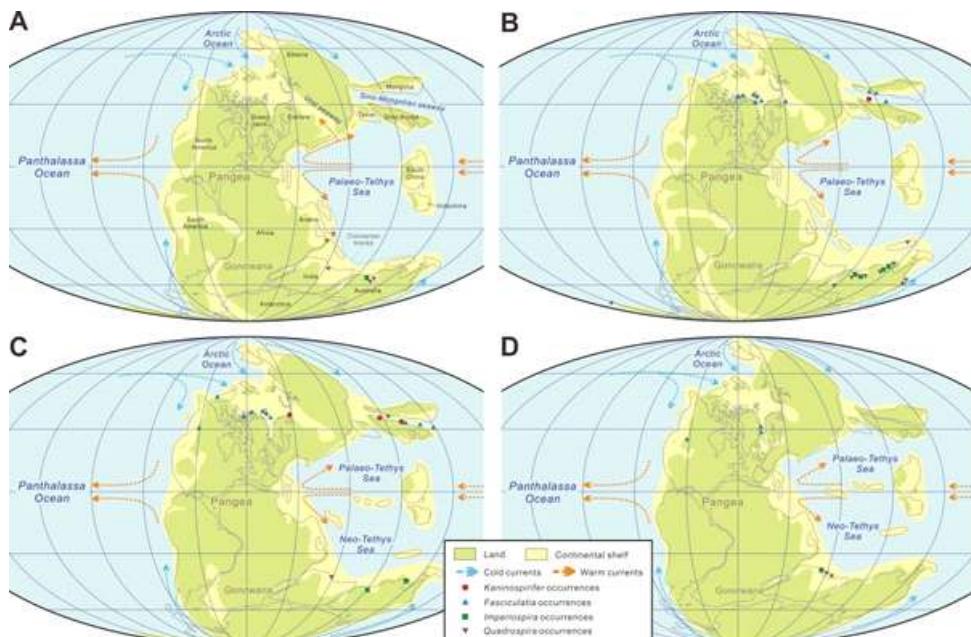


그림 3-26. 비슷한 형태적 특징들을 가지는 완족동물 4개 속(genus)들의 폐름기 고지리도상에서의 분포 (A-B, 폐름기 초기. C, 폐름기 중기. D, 폐름기 후기).

다. 고생대 삼엽충을 이용한 삼엽충 머리 마디구조 규명

오랫동안 연구되어온 삼엽충임에도 불구하고 불확실했던 머리 마디 구조를 최근의 발생생물학적 연구결과와 스발바르에 서식하던 삼엽충의 형태연구와 접목하여 규명하였다(그림 3-27). 캠브리아기 초기삼엽충(Redlichia)들의 경우 다양한 구조의 머리 마디가 존재하지만, 이후에 발달한 종류들은 보다 일정한 형태를 가져, 삼엽충의 머리 마디구조가 진화상으로도 중요한 의미를 가진다.

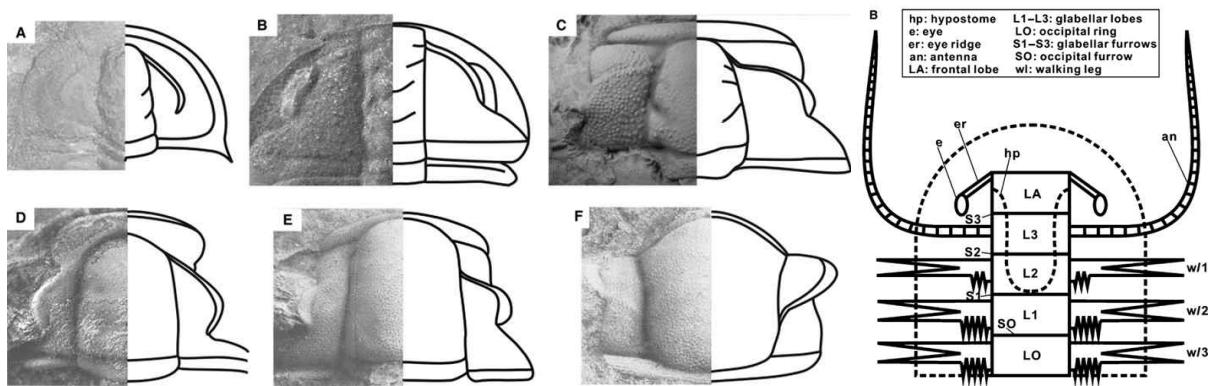


그림 3-27. 고생대 삼엽충의 머리 마디구조

라. 산처리 시료에서 다양한 형태의 미화석 분리

조사지역은 속성과정에서 기존의 석회질 성분이 규질성분으로 치환된 생물골격이 다수 나타난다. 이들을 염산으로 처리하면 주변의 석회암은 녹아나가고, 규질성분으로 치환된 화석들만이 분리된다. 큰 완족류 등 큰 골격도 규화 된 것이 많지만, 작은 화석들에 비해 전체적으로 규화된 시료는 많지 않다. 결과적으로 석회암의 산용해를 통해 얻은 화석은 미화석들 위주이며 이들을 다른 용해 잔여물로부터 분리해 기재했다(그림 3-27). 기존 수행해왔던 고생물학 연구들은 암석을 깨서 채집한 대형화석들 위주로 이루어졌기 때문에, 완족동물, 산호 등 제한된 동물군에 대해서만 고생물 연구를 수행할 수 있었다. 산용해를 통한 화석의 채집은 이러한 크기의 제한을 극복할 수 있으며, 3차원적 구조를 쉽게 파악할 수 있는 장점도 있다.

산용해를 이용해 분리한 화석은, small shelly fossil(해면동물 골편, 유공충, 연체동물, 필석류, 그리고 동정이 어려운 골격화석들)과 잘 보존된 태형동물들이 대표적이다. 이들에 대한 추가적인 연구로 고환경 및 고생태를 보다 완벽하게 재구성 할 수 있다. 또한 별도로 연구가 이루어지고 있는 산호 생물초 전체를 산으로 용해해 그 골격을 3차원적으로 해석한다면 박편을 통해 분석하는 것 이외에, 성장패턴과 생물초 골격에 대한 추가적인 정보를 획득할수 있다.

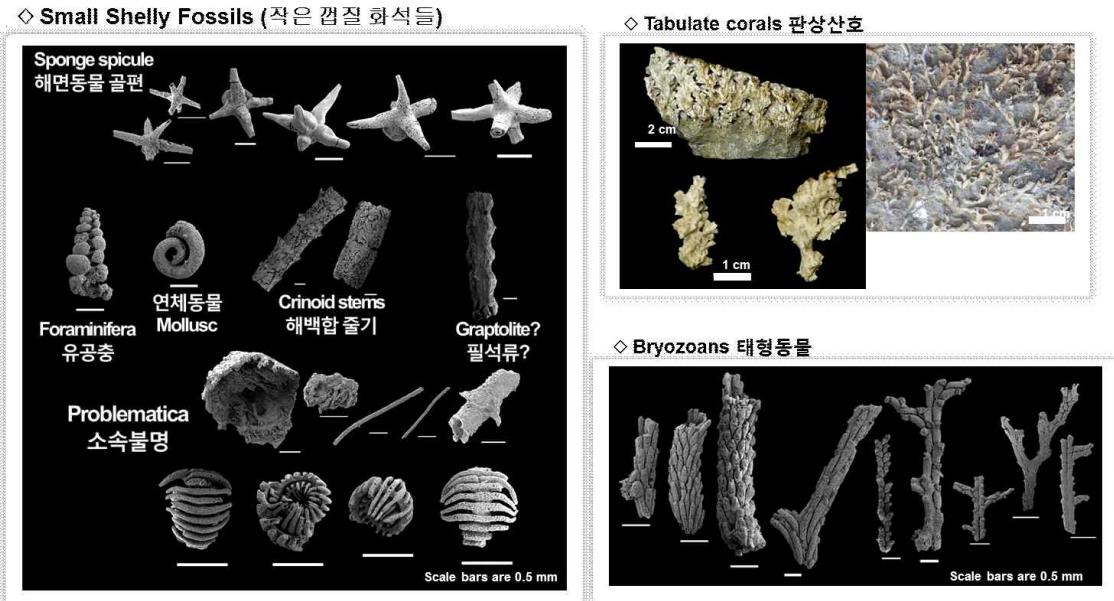


그림 3-28. 석회암의 산용해를 통해 분리해낸 규화된 화석들

4. 다산기지주변 후기고생대 고착성 동물의 고생태

가. Palaeoaplysina 생물초의 구조와 고생태

(1) Palaeoaplysina의 형태 및 계통 분류

Palaeoaplysina는 후기 석탄기에서 전기 폐름기 동안 광개아 초대류의 북서부에 분포했던 생물로, 당시 이 지역에서 발달한 생물초에서 흔히 보고되는 화석이다. 이들은 넓고 구불구불한 판상의 형태로 분지하는튜브상의 canal, 판 내부에 아라고나이트로 구성된 cellular 골격을 가지고 판의 윗면에는 볼록하게 솟아 오른 mamelon과 작은 구멍들이 도처에 산재해 있는 것이 특징이다(Anderson and Beauchamp, 2014) (그림 3-29). Palaeoaplysina는 해면동물(Krotov, 1888), hydrozoan(Breuninger, 1976; Davies, 1971; Davies and Nassichuk, 1973), 석회질 조류(Watkins and Wilson, 1989; Kiessling et al., 1999; Wahlman, 2002; Vachard and Kabanov, 2007)로 해석되었으나 그 생물학적 계통은 아직까지 불분명하다.

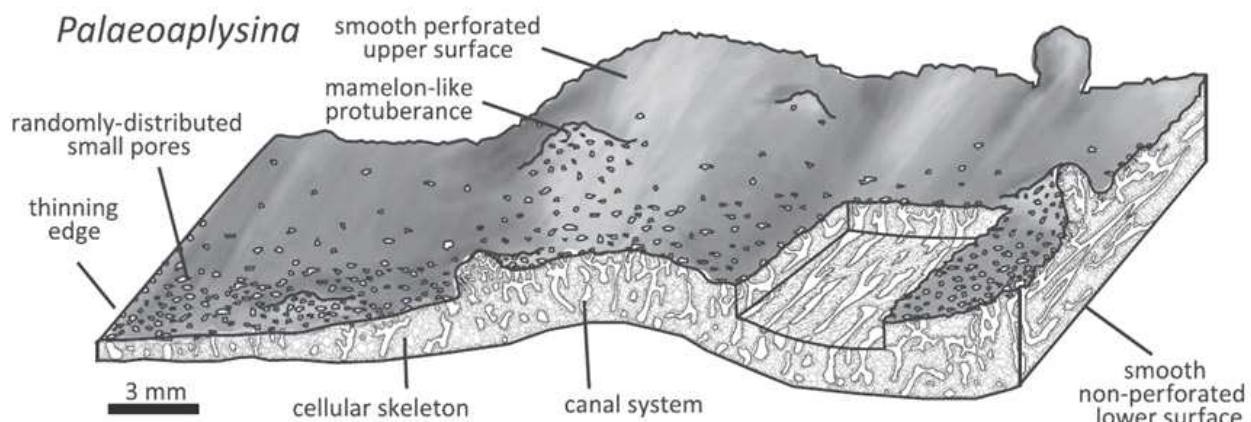


그림 3-29. *Palaeoaplysina*의 형태와 내부구조. *Palaeoaplysina*는 판상의 윗면에 국부적으로 볼록한 *mamelon* 구조를 가진 석회질 생물로 내부에는 분지하는 튜브형의 canal이 분포하고 그 사이사이에는 cellular 골격으로 구성되어 있다. Anderson and Beauchamp (2014)에서 발췌.

(2) *Palaeoaplysina*의 growth habit 및 생물초 형성에 대한 고생태학적 역할

*Palaeoaplysina*의 서식 방식에 대해서는 해저면에 대하여 수직적으로 서서 살았다는 해석(Davies, and Nassichuk, 1973; Beauchamp et al., 1989a)과 수평적으로 피복하며 살았다는 해석(Davies, 1971; Breuninger, 1976; Skaug et al., 1982) 등 의견이 분분하다. 이러한 성장 방식은 각각 *Palaeoaplysina*가 유수의 흐름에 의해 운반되던 퇴적물을 막으며 퇴적물을 집적시키는 baffle였는지 또는 퇴적물 및 생물초 구성 생물을 피복하고 스스로 생물초의 주요 골격을 형성하는 binder 및 frame-builder였는지 등 이들의 생물초의 성장에 기여하는 역할 및 생물초의 형성 과정을 재구성하는데 큰 차이가 있으므로, 탄산염 퇴적체의 발달에 있어 *Palaeoaplysina*의 growth habit에 대한 이해는 중요하다.

(3) 다산기지 주변 후기 고생대 Wordiekammen 층 *Palaeoaplysina* 생물초

다산기지 주변의 *Palaeoaplysina*는 상부 석탄기(Sakmarian-Asselian) Wordiekammen 층 Tyrrellfjelet 층원에서 수 매의 생물초를 구성하고 있다(그림 3-30). 생물초는 수십 센티미터~1 미터 두께의 층상의 바이오스트롬(biostromes)으로 와케암과 팩암 사이에 협재되어 있다(그림 3-30와 31A). 생물초 내부에는 어두운 회색의 *Palaeoaplysina* 판들이 분포한다(그림 3-31B-C). 이들은 대부분 굽곡진 모양으로 전반적으로 층리면에 수평적으로 놓여있고, 수직적으로 인접한 판들의 굽곡진 형태는 유사하다. 수직적으로 10 cm 내외의 구간에 조밀하게 놓여있는 *Palaeoaplysina* 판들은 층상 또는 렌즈상의 황색의 퇴적물과 교호를 하고 있다(그림 3-32).

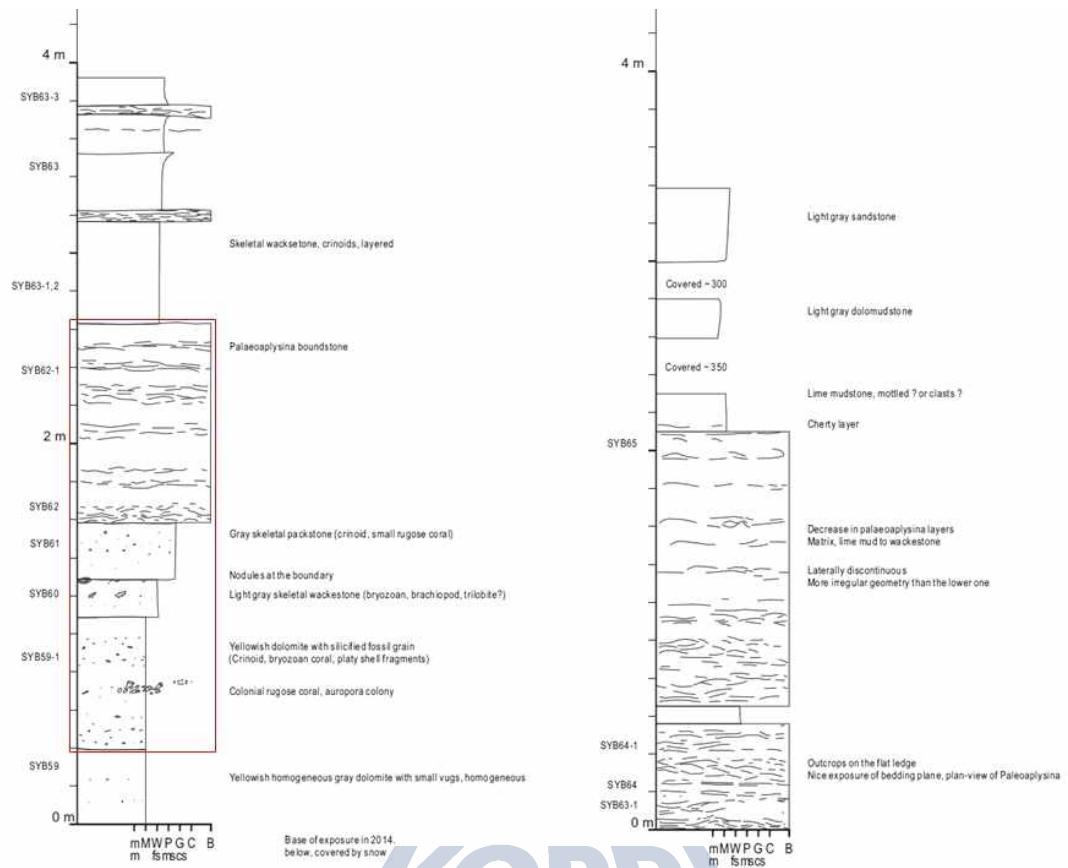


그림 3-30. *Palaeoaplysina* 생물초와 그 주변 퇴적층의 주상도. 붉은 사각형은 그림 3-3A 노두 사진 위치를 가리킨다.

극지연구소

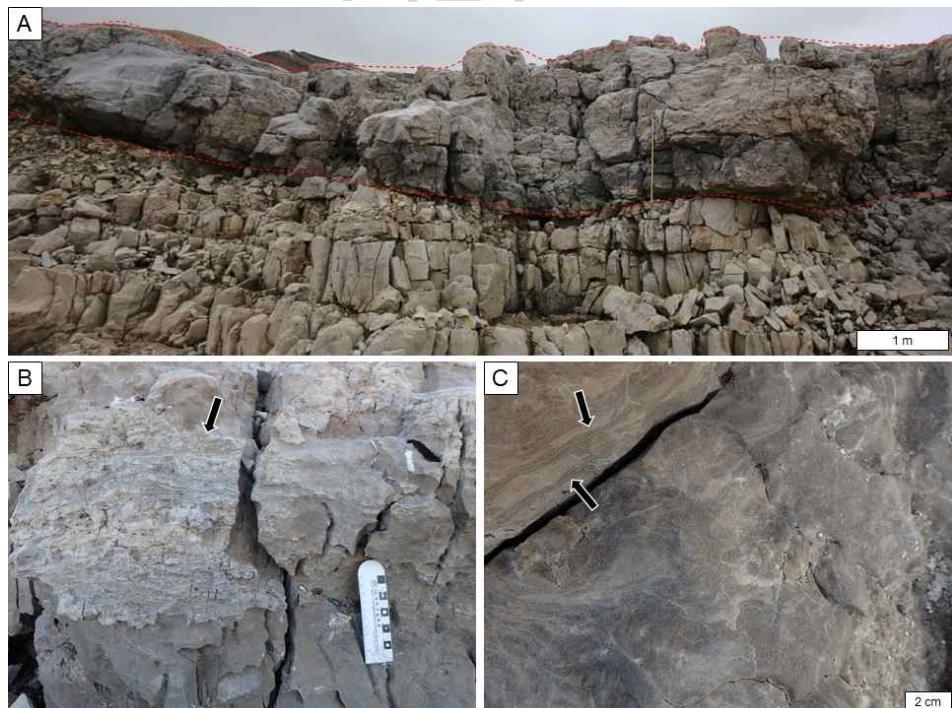


그림 3-31. *Palaeoaplysina* 생물초의 노두 사진. A) 층상의 *Palaeoaplysina* 바이오스트롬. B) 생물초(화살표) 내부에 검은 띠 형태의 *Palaeoaplysina*가 중첩되어 있는 모습. C) *Palaeoaplysina* 판들(화살표) 사이에 황색의 퇴적물이 채워져 있다.

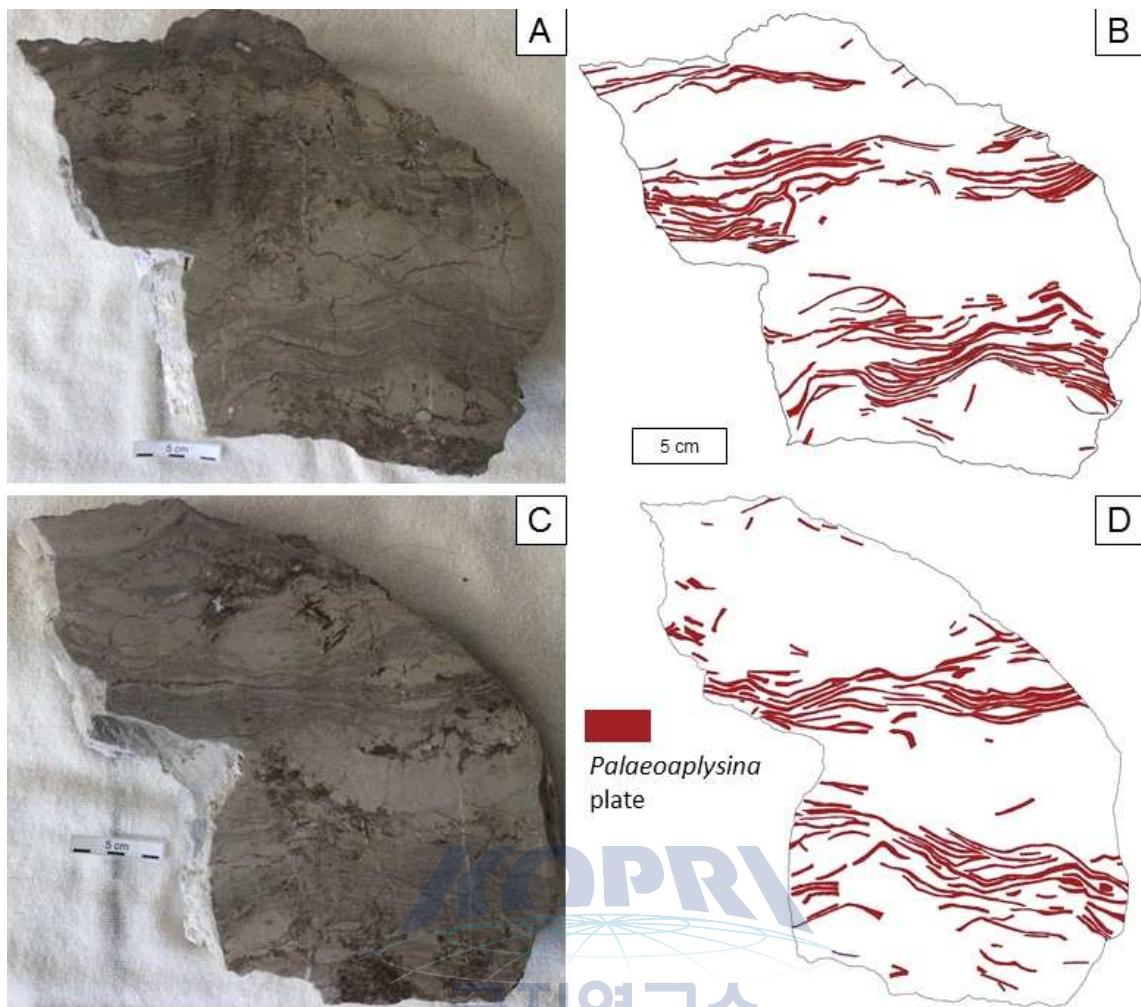


그림 3-32. *Palaeoaplysina* 생물초의 슬랩 사진과 스케치. 굴곡진 모양의 *Palaeoaplysina* 판들은 약 10 cm 내외의 두께로 조밀하게 분포하며 황색의 퇴적물 층과 교호하고 있다.

○ *Palaeoaplysina* 생물초의 구조

*Palaeoaplysina*는 0.2-0.3 cm이고 최대 0.5 mm의 두께 너비는 슬랩에서 최대 25 cm까지 나타난다. *Palaeoaplysina* 판 내부에는 수백 μm 직경의 석회 이질 퇴적물로 채워져 있는 튜브 형태의 canal이 있고 나머지 공간에는 방해석 교질물로 채워져 있다(그림 3-33). 판의 윗면에는 부분적으로 솟아올라온 구조인 mamelon과 많은 작은 구멍들이 관찰되는 반면에 판의 아랫면은 비교적 평평하고 작은 구멍들이 나타나지 않는다(그림 3-33). 230.9 cm^2 면적 분석 결과 *Palaeoaplysina* 판들은 생물초 전체의 25.2%를 차지하고 있다. 총 117개의 판들 중 80.3%는 윗면의 작은 구멍들이 윗 방향을 향하여 놓여있고 사교하거나 방향을 알 수 없는 판은 17.1%인 반면 뒤집힌 판은 2.6%로 극히 미미하다(그림 3-34).

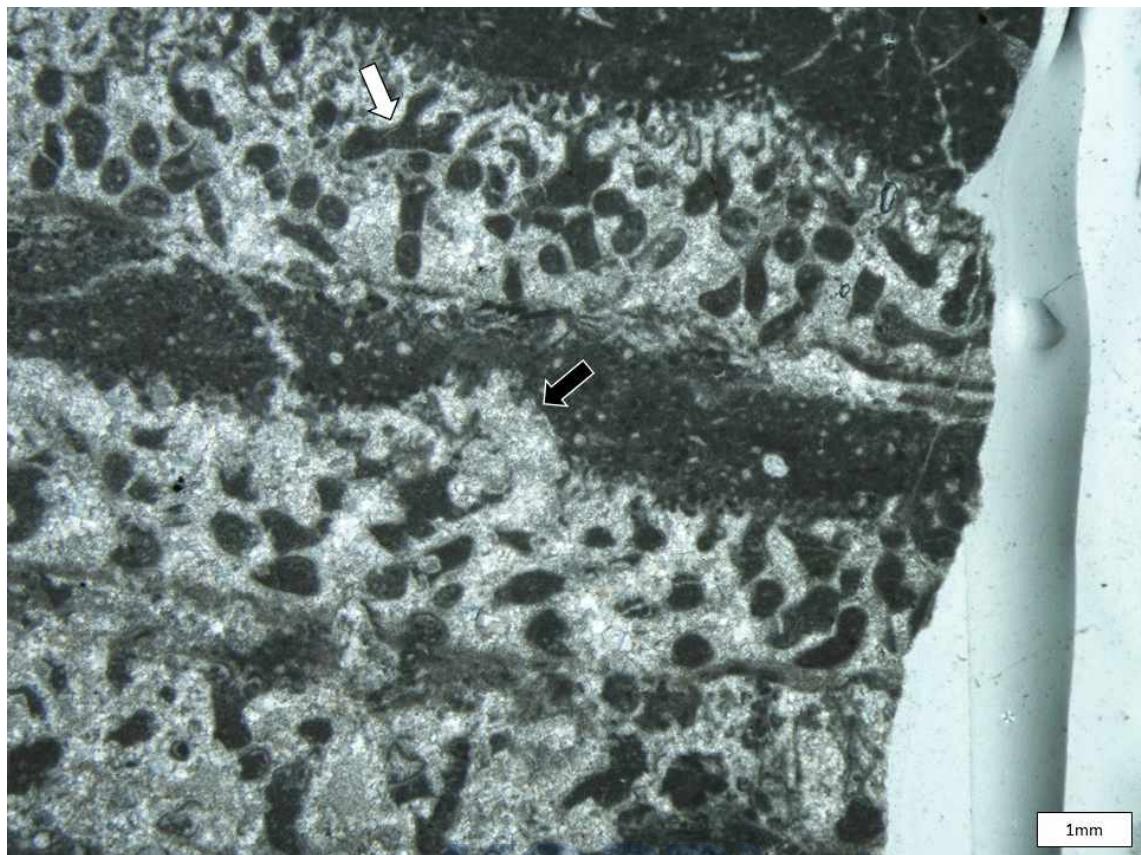


그림 3-33. *Palaeoaplysina*의 현미경 사진. 판상의 *Palaeoaplysina* 내부에는 석회 이질 퇴적물로 채워져 있는 분지상의 canal구조(흰 화살표), 윗면에 볼록 솟아 있는 mamelon(검은 화살표)과 윗면에 작은 구멍들이 관찰된다. canal 사이에는 방해석 교질물이 채워져 있다. *Palaeoaplysina* 판들이 서로 붙어 있거나(아래 부분) 한 매의 판(윗 부분)이 펠로이드 팩암에 둘러싸여 있다.

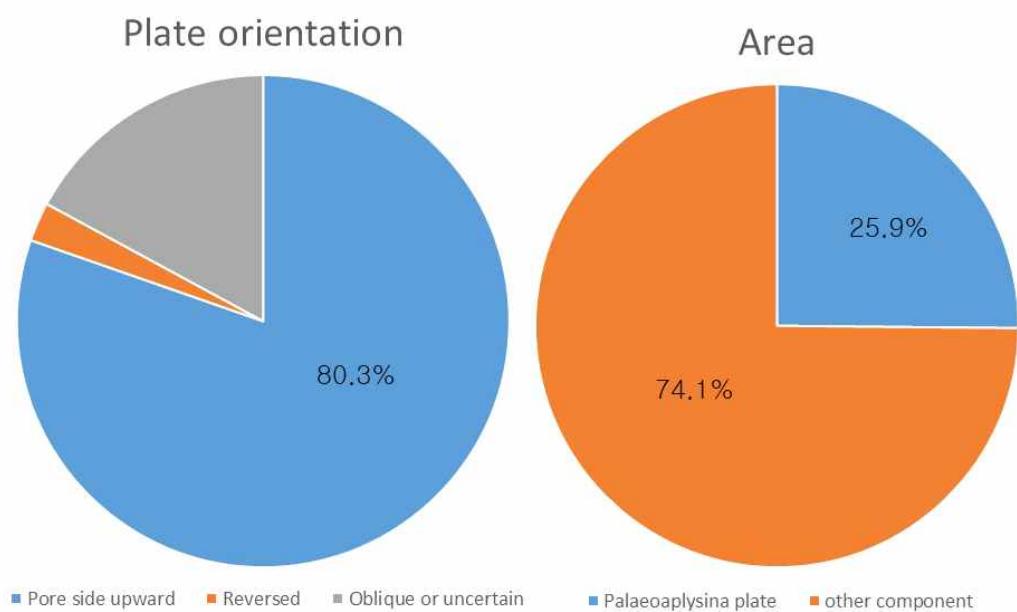


그림 3-34. 생물초에서 *Palaeoaplysina*가 차지하는 면적과 윗방향으로 놓여 있는 판들의 비율.

이러한 판들은 수직적으로 인접한 여러 매의 판들이 부분적으로 또는 대부분의 면에 대하여 밀착되어 수 센티미터 두께의 구조를 이루거나 각각의 판들이 퇴적물에 둘러싸여 서로 떨어져 있다(그림 3-3과 7). *Palaeoaplysina* 판의 밑면에는 하부를 향하여 성장한 판상의 bryozoan과 같은 고착형 동물이 붙어 있고, 위와 아래에 놓인 *Palaeoaplysina* 판 사이에는 펠로이드로 구성된 geopetal 퇴적물도 관찰된다(그림 3-35과 36). 생물초 내에 *Palaeoaplysina* 판들이 성기계 분포하는 부분에는 펠로이드와 석회이질 퇴적물, *Palaeoaplysina* 조각과 유공충, 드물게 완족류와 *Archaeolithoporella* 조각으로 채워져 있다.

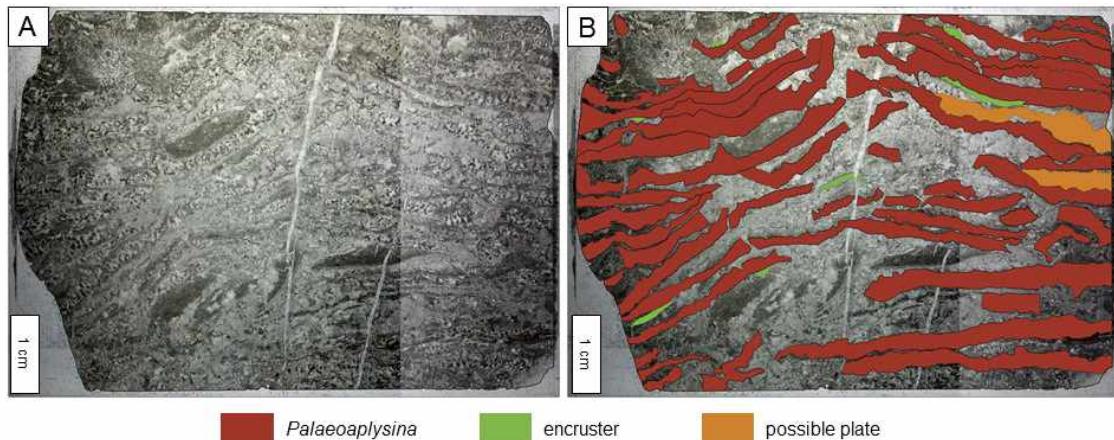


그림 3-35. *Palaeoaplysina* 생물초의 조직. A) 생물초의 박편 사진. B) 그림 3-7A의 스케치. 여러 매의 *Palaeoaplysina* 판들이 수직적으로 밀착되어 수 센티미터 두께의 구조를 이루거나 각각의 판들이 퇴적물에 둘러쌓여 서로 떨어져 있는 모습이 관찰된다.

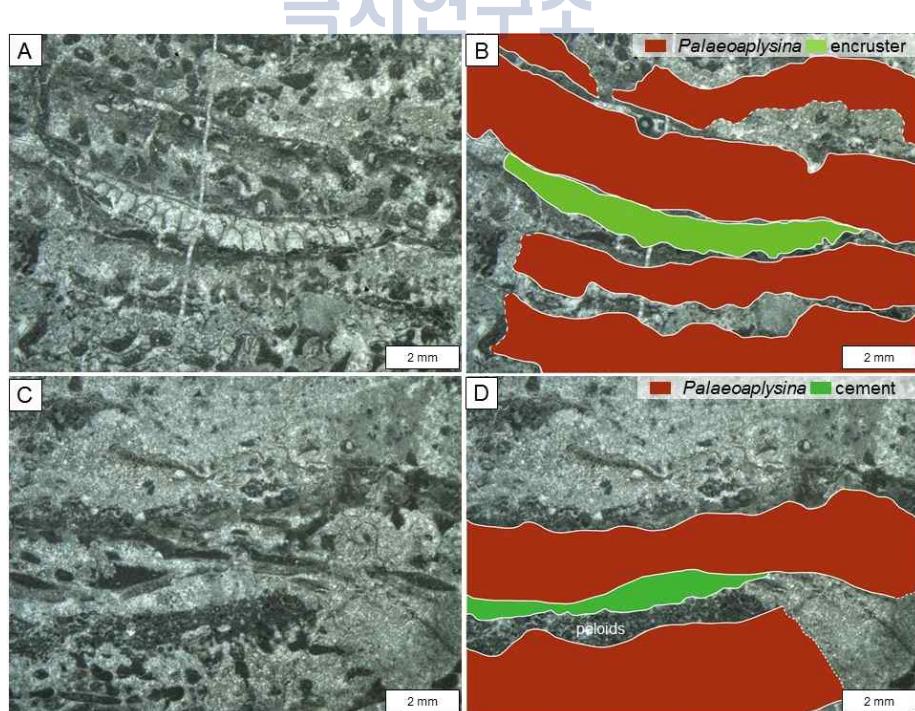


그림. 3-36. A-B) *Palaeoaplysina* 판 아랫면에 붙어있는 bryozoan의 현미경 사진과 스케치. C-D) *Palaeoaplysina* 판들 사이에 채우고 있는 펠로이드질의 geopetal 퇴적물과 방해석 교질물의 박편 사진과 스케치.

Palaeoaplysina 판의 대부분(80.3%)이 구멍이 뚫린 면이 위로 배열되어 있고, 판의 형태가 얇고 길며, 층리면에 평행하게 판들이 배열되어 있는 것은 생물초가 형성된 당시에 *Palaeoaplysina*가 조각 상태로 운반되어 퇴적된 것보다 성장한 모습 그대로 보존되었기 때문으로 보인다. 판과 판 사이에서 관찰되는 geopetal 구조와 판의 밑면에 부착하여 성장한 bryozoan이 관찰되는 것으로 보아 퇴적 당시에 판과 판의 사이에 있는 공동은 *Palaeoaplysina* 판들이 수차례 피복하며 형성된 일차 공동이었을 것으로 해석되며, 판의 밑면에 부착하여 나타나는 bryozoan은 cryptic encruster일 것으로 해석된다. 이것은 *Palaeoaplysina*가 직립하여 성장하는 형태로 해석할 경우 판이 원 위치(*in situ*)상태로 퇴적될 수 없기 때문에 나타날 수 없는 특징으로 인접한 판들끼리 밀착되어 있는 모습, 일차 공동, 그리고 cryptic encruster의 존재는 *Palaeoaplysina*의 *in situ* growth와 encrusting habit을 주장하는 직접적인 증거가 될 수 있으며, 생물초의 형성에 있어 binder 및 판들이 중첩되어 생물초의 골격을 형성한 frame-builder 역할을 한 것으로 생각된다.

(4) Wordiekammen *Palaeoaplysina*의 고생태학적 의의

*Palaeoaplysina*의 growth habit에 대한 기준 연구는 크게 erect habit을 주장하는 연구와 encrusting habit을 주장하는 연구고 그 의견이 아직까지 분분하다. Erect habit으로 해석하는 주장은 1) 해당 연구에서 관찰한 판 중 20%가 뒤집혀 있는 형태로 해저면에 encrusting habit으로 붙어 살았을 경우에는 대부분의 판이 같은 방향으로 배열되어 있어야 하고, 2) 두 plate의 접하는 상태가 바로 아래 판의 굴곡을 따라가지 않고 개별적이며, 3) encruster가 판의 하부에 부착되어 있는 것으로 보아 만약 *Palaeoaplysina*가 해저면에 부착되어 encrusting 형태로 자랐을 경우 encruster가 땅을 파고드는 형태로 자라야 하기 때문에 생물학적으로 불가능하고, 4) *Palaeoaplysina*와 형태적으로 유사한 Phylloid algae가 erect habit을 가지고 있으며, 5) 이들이 기저면에 부착했던 holdfast의 흔적이 관찰되지 않는다는 것이다(Watkins and Wilson, 1989). Encrusting habit으로 해석하는 주장은 1) 뿌리와 같은 형태의 rhizome이 판의 바닥 부분에 붙어 있기 때문에 이를 통해 해저에 encrusting 하는 형태로 성장했을 것이라는 주장(Nakasawa et al., 2011), 2) 대부분의 판이 층리면에 평행한 형태로 나타나며 판의 윗면에 있는 작은 구멍이 있는 면이 지층의 상부를 향해 배열되어 있어 *Palaeoaplysina*가 encrusting habit을 나타냈을 것으로 추측하는 의견이다(Breuninger, 1976).

이 연구의 Wordiekammen *Palaeoaplysina* 생물초에서는 erect habit 주장과 비교하면 encruster가 판의 하부에 부착되어 있는 점과 Phylloid algae와의 형태적 유사성, 그리고 holdfast의 부재 등이 유사하나 Wordiekammen층의 *Palaeoaplysina*는 미미한 양의 판만이 (2.6%) 뒤집혀 있고 너비가 월등히 넓으며 인접한 판의 굴곡이 따라간다는 점에서 다르다(cf. Watkins and Wilson, 1989). 생물초의 growth cavity에 이질 퇴적물로 채워질 수 있으므로 *Palaeoaplysina* 판의 밑면에 부착된 encruster가 퇴적물로 둘러싸여 있는 것이 *Palaeoaplysina*가 erect habit이라는 해석에 대한 증거로서는 불충분하며 Phylloid algae와의 형태적 유사성으로 생태학적 역할에 대해 유사했을 것으로 해석하는 것에는 무리가 있고, holdfast의 존재는 화석화 작용 동안의 보존의 문제일 가능성이 있으므로 이러한 유사성을 기반으로 *Palaeoaplysina*가 직립하며 서식했을 것으로 해석하는 것은 무리가 있는 것으로 판단된다.

반면에 *Palaeoaplysina*의 encrusting habit이라는 해석을 지지하는 증거인 대부분의 *Palaeoaplysina* 판들이 층리면에 평행하게 배열되어 있고 뒤집히지 않은 배열 상태를 보이는

것은 유사하나 이들을 판이 원위치 상태로 보존되었다는 직접적인 증거로 보긴 어렵다(cf. Breuninger, 1976). 다른 간접 증거인 holdfast와 같은 기관은 이 연구에서는 관찰되지 않았으나 상기한 대로 속성 작용 동안의 보존 문제일 가능성성이 있으며, 인접한 판들끼리 밀착되어 있는 양태와 일차 공극의 존재를 보여주는 Wordiekammen Palaeoaplysina의 연구 결과는 Palaeoaplysina가 당시 encrusting habit을 가지고 서식하였다는 직접적인 증거를 처음으로 보여주는 것으로 사료된다. 겹겹이 쌓인 Palaeoaplysina 판들이 수직 성장하여 형성된 Wordiekammen 생물초에서 Palaeoaplysina는 binder 및 frame-builder로서 생물초의 골격을 형성하는데 기여했을 것으로 생각된다.

나. Tabulate coral의 분류와 고생태

다산기지 주변 후기 고생대 상판산호 연구에서는 Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet 층에서 산출된 석탄기 상판산호의 고생물학적 성장 특성을 고생태학적인 요인과 연결하여 분석해보고자 하였다. 현재 진행 중인 이 연구에서는 주로 석탄기-폐름기에 유럽, 아시아, 북미 지역을 포함하여 전 세계에 걸쳐 살았던 것으로 알려진 auloporid 산호류들이 주요한 연구 대상으로 분석되었다 (그림 3-37). 2014년에 실시된 다산기지 야외조사 기간에 확보된 다수의 산호 화석이 포함된 암석들을 실내 분석하였다. 대부분의 화석들은 외골격이 규화된 상태이며 또한 부분적으로 심한 reworking을 받아 온전한 상태의 개체가 많지 않았으며 이 점을 고려하여 10여 개 군체표품을 대상으로 개체의 증식과 군체의 성장특성을 파악하기 위한 횡단면 연속 박편 (serial transverse sections)을 제작하였다. 분석을 위한 연속 박편의 간격은 1.5 - 2.0 mm로 하였으며 300 여개의 박편이 제작되었다.

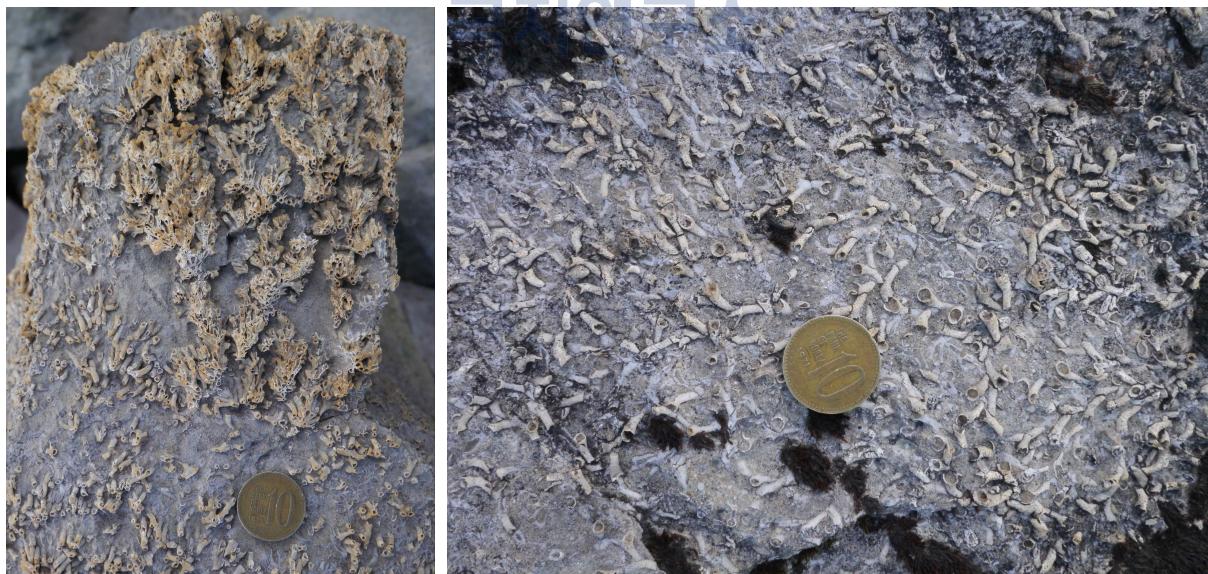


그림 3-37. Brøggerhalvøya 지역 석탄기 Scheteligfjellet 층에서 산출되는 산호화석들. 현재까지의 분석 결과 크게 2개 속에 속하는 auloporid 목의 상판산호들이 확인되었다. 좌측은 phaceloid 혹은 덤불 형태의 성장 형태를 갖는 *Multithecopora*이며, 우측은 ‘기는 줄기’ 형태의 성장형을 갖는 *Aulopora*로 추정된다.

Scheteligfjellet 층에서 현재까지 분석된 상판산호는 *Multithecopora*와 *Aulopora*로 auloporid 목에 속한다 (그림 3.3-38). 특히 *Multithecopora*는 2개 종 (*M. syrinx*, *M. tchernychevi*)이 확인되었으며 (그림 3.3-38), 이 2개 종은 1991년 Nowiński가 Spitsbergen의 Hornsund와 Isfjorden에서 기재한 바 있다. 이들은 주로 석탄기-페름기 사이에 USSR의 Donetsk Basin과 Spitsbergen에서 그 산출이 보고 되었다 (Nowiński, 1991).

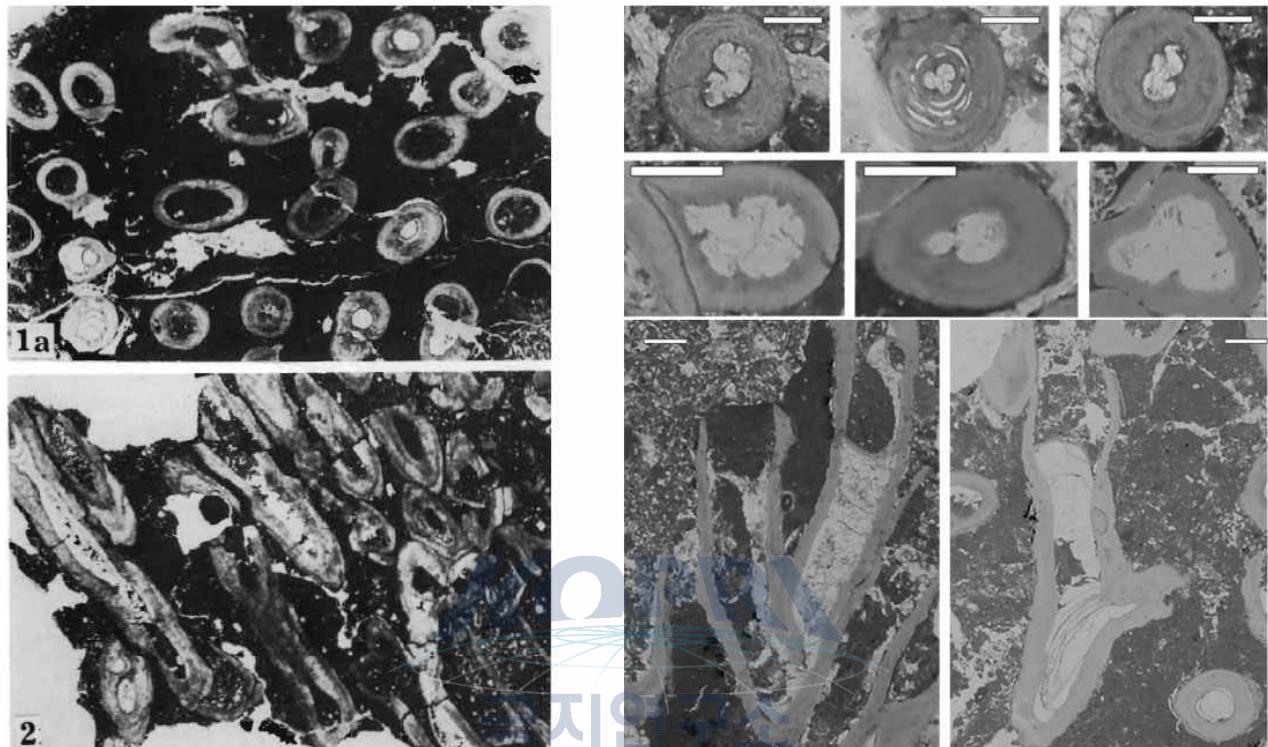


그림 3-38. *Multithecopora syrinx*의 횡단면 및 종단면 박편 사진. Nowiński (1991)가 보고한 Hornsund와 Isfjorden에서의 *M. syrinx* (좌측)와 유사한 형태의 *Multithecopora*가 Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet 층에서도 산출됨 (우측). 우측 그림의 scale bar는 크기와 관계없이 모두 1 mm로 동일하다.

1989년, 1991년 Ludwig에 의해 수행된 Brøggerhalvøya Scheteligfjellet 층 퇴적상 및 퇴적환경 연구에서 multithecoporid 산호의 존재는 기재된 바 있다. 또한 Buggisch et al. (2001)에서 이 산호를 *Multithecopora cf. syrinx*로 추정하였다. 이 상판산호에 관한 생물학적 분석 및 정확한 동정은 현재까지 이루어지지 않은 상태이지만, 2 m 두께의 이 multithecoporid가 포함된 탄산염암층은 기존 Nordenskiöldbreen 층에 포함되었던 Scheteligfjellet 층원 (member)를 인지하는 중요한 기준층 (key bed)으로 알려져 왔다. 이 연구는 단순히 multithecoporid 혹은 *Multithecopora cf. syrinx*로 기재된 Scheteligfjellet 층의 *Multithecopora*의 개체 중식과 성장 특성을 분석하여 보다 정확한 생물학적 동정과 분류를 목표로 계획되었으며, 나아가 비슷한 시기의 다른 고대륙에서 산출된 *Multithecopora*와의 비교를 통해 Spitsbergen의 *Multithecopora*가 갖는 지역적 특성이 있는지도 추가로 정리해볼 수 있을 것으로 보인다.



그림 3-39. Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet층에서 발견된 *M. tchernychevi* 포함된 탄산염암을 10% 염산에 녹인 샘플. 가지상에 가까운 phaceloid형태의 *M. syrinx*와는 달리, *M. tchernychevi*는 한 세대마다 성장 시작 부분들이 수평적으로 연결되어 있는 특징을 보인다.

현재까지 진행된 *Multithecopora* 연구에서는 주로 두 종의 *Multithecopora*의 고생물학적 특징과 개체 증식 방식의 분석에 초점이 맞춰져 있는 상태이다. Scheteligfjellet층에서 발견된 두 개 종의 *Multithecopora*는 각각 현저하게 다른 외골격 형태를 갖고 있으며, 이 차이점으로 인해 종 단위까지의 동정이 가능했다. 그러나 *M. syrinx*에 비해 *M. tchernychevi*의 개체수는 현저하게 적으며, 이 종을 명확히 구별하기 위한 하단의 연결된 ‘성장판’을 찾지 못한 경우 phaceloid 성장형의 *M. syrinx*와 혼동될 소지가 존재한다. 현재 외골격 형태에서가 아닌, 연속 박편에서의 두 종의 차이점이 존재하는지 여부를 검증하기 위한 연구가 진행 중이며, 최종 결과에는 이를 반영하여 Scheteligfjellet층의 *Multithecopora*의 계통고생물학 분류 결과 (systematic paleontology)를 보고할 예정이다.

Auloporid목의 산호들은 대부분이 ‘기저 증식 (basal-increase)’ 방식으로 개체 증식을 한다고 알려져 있지만, *Multithecopora*의 경우 단순 측면 증식 (lateral increase) 으로만 보고되었으며 (Hill, 1981) 어떤 과정을 거쳐 분열되는지에 대해서는 상세히 알려진 바 없다. 본 연구에서는 연속 박편 기법을 이용하여 *Multithecopora*의 성장 패턴을 분석하였다 (그림 3-39).

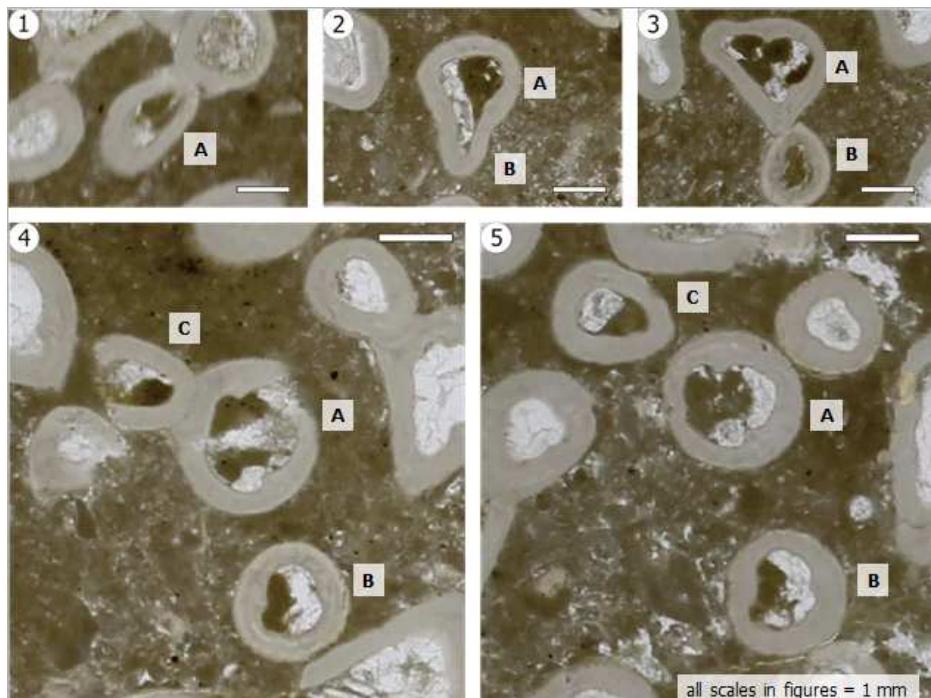


그림 3-40. 연속 박편에서 나타난 *Multithecopora syrinx*의 코랄라이트 개체 증식. 각 그림의 스케일은 1 mm로 동일하며 연속 박편간의 간격은 평균 1.5 mm이다.

단일 *Multithecopora*의 코랄라이트 개체가 증식할 수 있을 만큼 충분히 성장하면 (그림 3-40), 작은 발아체가 모체의 측면에서 돌출된다 (그림 3-40). 이 발아체가 충분히 성장하면 모체와의 사이에 벽이 생기면서 별개의 개체로 독립된다 (그림 3-40). 이와 같은 방식은 보통의 상판산호가 lateral increase할 때와 유사한 것으로 보이나, *M. syrinx*는 모체가 제 1발아체를 독립시킴과 동시에 제 2발아체를 생성하며 (그림 3-40, 41), 혹은 모체의 좌우에서 동시에 2개의 발아체가 발생했다가 순차적으로 또는 동시에 모체로부터 분리되는 경우도 관찰되었다. 또한 일반적인 상판산호에서와 달리, 발아체가 충분히 성장하기 전까지는 모체와 분리되지 않고 함께 성장하는 것으로 보인다. 이같은 개체 증식은 ‘기저 증식 (basal increase)’으로 불리는 auloporid류 산호들이 증식하는 전형적인 방식인 것으로 추정되며 (Scrutton, 1990), 일부 phaceloid 혹은 덤불처럼 보이는 *M. syrinx*의 계통 소속을 온전히 auloporid로 분류할 수 있는 근거가 될 수 있다.

Scheteligfjellet층에서 발견된 또 다른 종류의 상판산호인 *Aulopora*는, ‘기는 줄기’처럼 보이는 외골격 형태에 의거하여 분류되었다. *Multithecopora*와는 달리, *Aulopora*는 기존의 Scheteligfjellet층 연구들에서도 보고된 바가 없는데, 대체로 퇴적암 내부의 층리면 (bedding plane)에 평행하게 보존되기 때문에 수직적인 측면에서는 외골격 형태가 완전히 보이지 않았을 것으로 추정된다. 또한 일부 골격 파편들만 보았을 때는 *Multithecopora*와의 차이점을 인지하기 힘들기 때문에 보고가 누락되었을 것으로도 볼 수 있다.

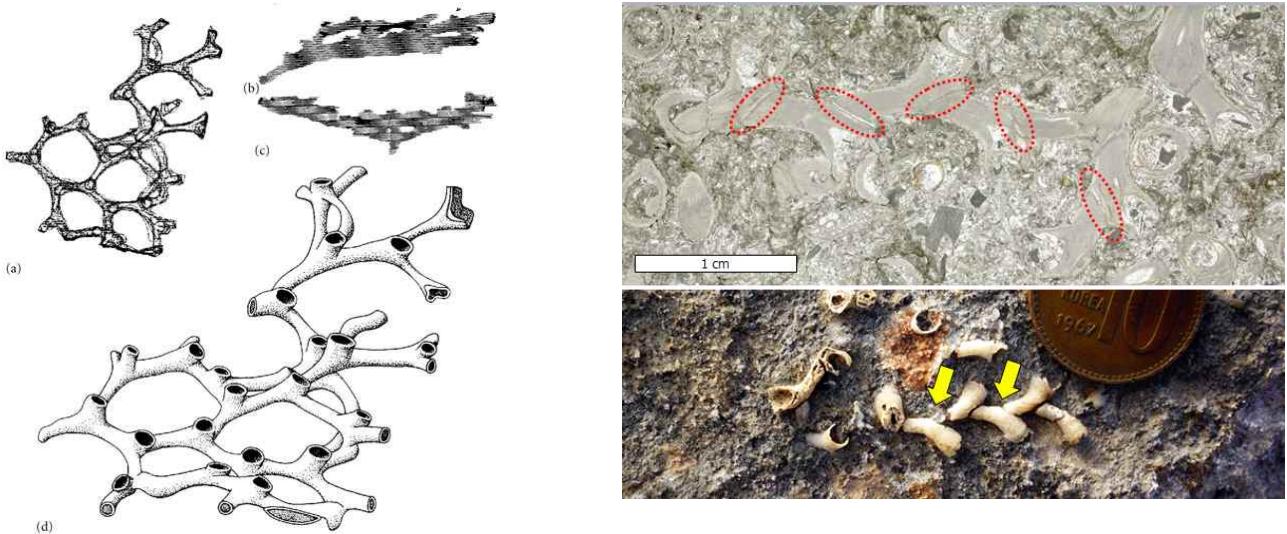


그림 3-41. 일반적으로 알려진 *Aulopora*의 성장 형태 (좌측, Scrutton, 1990)와 Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet 층에서 산출된 *Aulopora*의 성장 형태 (우측). *Aulopora*의 코랄라이트 개체가 분기되는 부분마다 분절되어 그 공간에 시멘트 (cement)가 채워진 것이 보인다.

본 연구에서 분석한 바에 의하면, Scheteligfjellet 층에서 산출된 *Aulopora*의 경우 기존에 보고된 *Aulopora*와는 현저하게 다른 방식의 성장형태를 갖고 있는 것으로 관찰되었다. 기존의 *Aulopora* 연구들에서는 calice의 벽면에서 새로운 코랄라이트가 돌출되어 basal increase (그림 3-40 참고) 방식으로 증식하는 방식이 주로 보고되어 왔다 (Hill, 1981; Scrutton, 1990). Scheteligfjellet의 *Aulopora*의 경우, 단일 코랄라이트 개체가 성장할 때, ‘가지치기 (branching) 방식’을 채택하지만 자세히 보면 모체에서 새로운 가지가 뻗어나갈 때 모체와 붙어 있던 부분이 일일이 분절되어 있는 것으로 보인다 (그림 3-41). 연속 박편에서의 성장 방식 자체는 *Multithecopora*의 분석 결과와 동일하게 기저 증식 (basal increase)으로 증식하지만, 발아체가 완전히 성장한 이후에는 모체와의 연결이 끊어지는 형태로 보존된 것을 알 수 있다. 이는 그림 3-41에서도 알 수 있듯이, 대부분의 *Aulopora* 군체의 분리된 개체들 사이에 시멘트 (cement)가 채워져 있는 것으로 보아 보존상의 문제가 아닌 *Aulopora* 자체의 특징인 것으로 추정된다.



그림 3-42. Scheteligfjellet 층의 *Aulopora*가 포함된 탄산염암을 10% 염산에 녹였을 때 추출된 산호의 코랄라이트 조각들. 일부는 가지상으로 분기된 부분이 분절되지 않은 경우도 있지만 (좌측, 백색 점선원) 대부분의 경우 하나의 방향성을 가진 짧은 단일 개체로 추출된다. 이들은 각각의 개체가 분리되어 있지만, 암석에 보존된 형태에서는 우측의 사진처럼 하나의 군체를 이루는 것처럼 보인다.

이와 같은 특징은 산 용액에 산호 군체가 포함된 탄산염암을 녹였을 때 더욱 두드러진다 (그림 3-42). 이들 코랄라이트 가지들은 각각 분리가 가능하지만, 탄산염암에서 보존된 형태에서는 분리되지 않은 채 전체가 군체를 이룬 형태 그대로 유지되었다. 이와 같은 성장 형태의 *Aulopora*는 기존에 보고된 적이 전혀 없으며, 1) Scheteligfjellet 층의 *Aulopora*가 독특한 특징을 갖는 고유종 (endemic species)일 가능성 혹은 2) Scheteligfjellet 층의 환경이 *Aulopora*의 생존에 영향을 미치는 외부 요인이 되어 성장 방식을 변화시켰을 가능성 등이 제기될 수 있다. 코랄라이트 가지들이 일일이 분절된 형태는 현생 산호들 중 *Acropora palmata*의 케이스에서 보고되었던 분절 증식 (fragmentation) 방식의 무성 생식 (asexual increase)의 한 종류와 유사하며 (Lirman, 2000) 이는 외부 요인에 반응한 *Aulopora*의 생활사전략 (life-history strategy)의 하나로도 볼 수 있을 것이다. 이에 관해서는 더 많은 자료의 수집과 준비가 필요한 상태이다.

석탄기-폐름기 시기는 전 세계적으로 다양한 생물들이 보고되었던 시기이고, 특히 산호의 경우 상판산호나 사사산호 모두 다양한 종류가 알려져 왔다 (Fedorowski, 1981). 그러나 Brøggerhalvøya의 Scheteligfjellet 층에서는 2개 속의 상판산호만 동정된 상태이다. 같은 고대륙인 Spitsbergen에서도, Honrsund와 Isfjorden의 경우 비슷한 시기에 훨씬 다양한 종류의 상판산호가 보고되었던 (Nowiński, 1991) 것과 대조적으로 Scheteligfjellet 층의 탄산염암에서는 기존 보고 뿐 아니라 현재까지의 분석에서도 산호 화석의 다양성이 떨어지는 경향을 보인다. 이 문제는 추가로 탄산염암 표본들을 확보하여 새로운 박편을 제작하는 동시에 기존 자료들의 철저한 재확인 작업을 거친 이후 Scheteligfjellet 층에서 산출되는 산호류의 종류를 재확정하는 작업을 우선적으로 요구한다. 또한 타 대륙 혹은 Spitsbergen의 다른 지역과 Brøggerhalvøya 지역의 고환경이 달랐을 가능성을 시사하며, 좀 더 정확한 고찰을 위해서는 후기 고생대 시기의 고환경 복원 연구가 병행되어야 할 것으로 전망된다.

5. 스피츠베르겐 고생대 연구지 사전답사

다산기지에서 수행하고 있는 후기고생대 층의 광역적인 의미를 파악하고 스발바르 전역에 존재하는 다른 시기 암석에 대한 사전조사를 위해 헬기를 이용하여 2차 년도에 걸친 현장조사를 실시하였다.

가. 1차년도 조사

1차년도에 스발바르 정부(Sysselmannen)가 긴급상황 대비용(S&R, search and rescue)으로 운영하고 있는 헬기(Super Puma)를 임차하여 원거리 조사지에 대한 현장조사를 실시하였다. 해당헬기는 대형기종(그림 3.3-43)으로 정원은 16명이며 항속거리는 1000 km이상에 달한다. 기체가 크고 자체레이더를 보유하고 있으며, 스발바르의 특징적인 낮은 구름 위로 운항할 수 있기 때문에 기상의 영향을 덜 받고 안정적으로 활용할 수 있다. 하지만 시간당 운행 비용이 크며 (시간당 1000만원 상당), S&R용도로 운영하는 헬기의 대기시간을 활용하기 때문에, 현장에 연구자들을 내려주고 다시 롱이어비엔으로 되돌아가야하기 때문에 결과적으로 왕복비행 비용을 두 번 지불해야하는 단점이 있으며, 만약의 경우에 롱이어비엔으로 바로 복귀하기 어려운 단점이 있다.



그림 3-43. 1차년도에 활용한 스발바르 정부(Sysselmannen)의 헬기(Super Puma)

1차년도는 스발바르 전역의 다양한 지질시대 암석을 대상으로 연구 테마를 발굴하는 것에 목적을 두었다(그림 3-44).

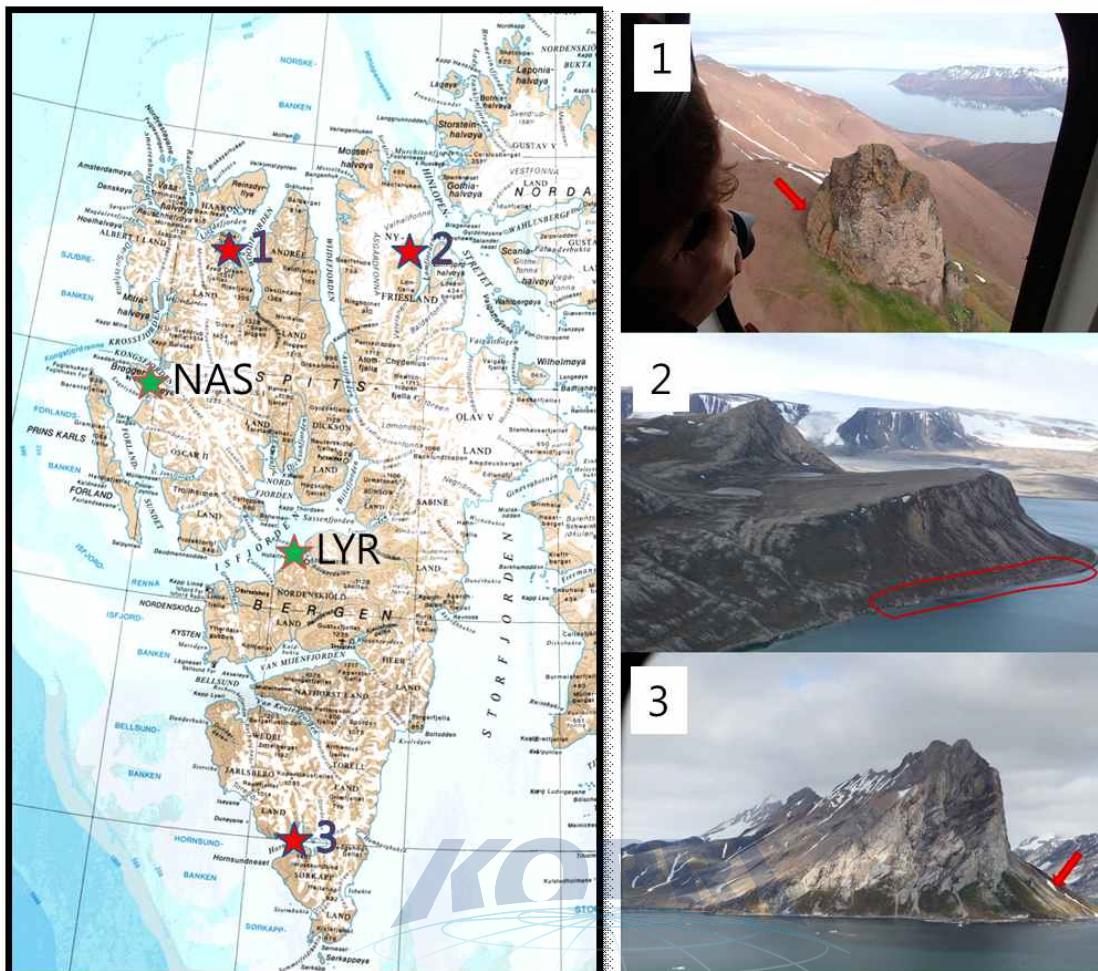


그림 3-44. 1차년도 헬기이용 원거리 조사지역. 1. 신생대 화산암 지역. 2. 선캠브리아기 석회암 지역. 3. 캠브리아기 퇴적암 지역.

(1) 신생대 화산암 지역

스발바르 북부에 위치하는 화산암 지역에 대한 현장조사를 실시하여 시료분석 및 맨틀진화에 관한 연구를 수행하였으며, 자세한 내용은 3.4 절에 포함되어 있다.

(2) 선캠브리아기 석회암지역

스발바르 동북부에는 잘 보존된 선캠브리아기 석회암(그림 3-45)과, 빙하퇴적체 등이 노출되어 있다. 이번 연구에서는 기존 문헌에서 보고한 석회암 지역을 방문하여 주상도를 작성하고 시료를 채취하여 박편관찰을 실시하였다. 그 결과 알려진 연대(약 800 Ma)에 비해 매우 우수한 1차구조의 보존상태를 가지고 있음이 규명되었으며, 향후 퇴적상분석, 지화학, 미고생물학 등 다양한 분야의 연구를 수행할 수 있으리라 판단된다.

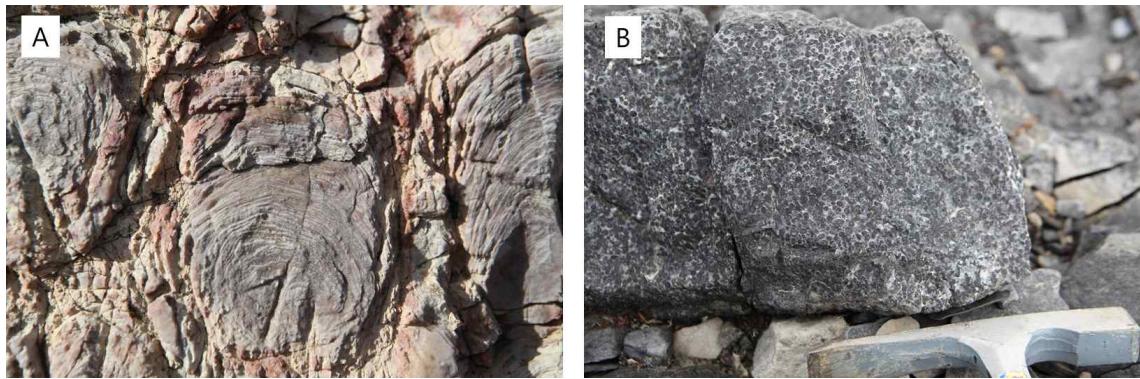


그림 3-45. 스발바르 동북부의 선Camb리아기 석회암. (A) 스트로마톨라이트. (B) 온코이드.

(3) 캠브리아기 석회암 지역

이 지역은 스피츠베르겐 남쪽 혼순드(Hornsund)의 북쪽 해안에 위치하며, 서부 습곡-단층대에 포함되어 구조적 변형이 심한 편이다. 이곳에 위치하는 석회암과 흑색세일을 대상으로 화석의 유무를 판별하기 위한 작업을 실시하였지만 현장에서 화석을 찾는데는 실패하였으며, 실험실에서 산용해를 통해서 미화석을 분리하는 실험을 진행했지만 의미있는 결과를 도출하지 못했다. 구조변형과 함께 약한 변성작용을 함께 받아 구조와 변성암석학적 연구가 병행되어야 의미 있는 충서연구가 가능할 것으로 판단된다.



그림 3-46. 스발바르 남부의 캠브리아기 석회암과 흑색이암. (A) 조사지역 전경 (B) 조사한 단면.

나. 2차년도 조사

2차년도에는 롱이어비엔을 기반으로 NPI 헬기와 안전요원 등 이용한 답사를 실시하였다. 9월 5, 6, 7일 3일간 임차 하였으나 7일은 악기상으로 활용 못했다 결과적으로 1차년도 답사지에 대한 후속조사는 실패하였으며, 다산기지 주변에서 연구하고 있는 후기고생대 지층과 퇴적상 연구를 위한 추가 재료 확보를 위한 지역을 답사하였다. 답사지는 Isfjorden 주변의 후기고생대 퇴적암 지역이다. 2차년도에 활용한 헬기는 AS350 기종(그림 3-47)으로 남극장보고기지에서 운영하는 헬기와 같은 기종이다. Sysselmannen 헬기(Super Puma)에 비해 소형이어 비용과 활용성이 뛰어나지만 기체가 크고 자체 레이더를 보유한 스발바르정부 운영 Super Puma에 비해 악천후 대응 능력은 떨어진다. 남극에서 운영하는 방식과 가장 다른 점은 조종사와 정비사가 항상 함께 이동한다는 것이며 결과적으로 연구자와 연수 장비 및 시료를 위한 공간에 제약이 있다.

AS350 chartered from NPI



그림 3-47. 2차년도에 활용한 AS350

(1) Skansen 지역

석탄기 워디에카멘층에 대한 추가 연구를 위해 조사하였다(그림 3-48). 이 지역은 변성 기반암과 Wordiekammen층이 직접 만나는 지역으로 석탄기 최초 퇴적작용이 사암과 역암으로 일찍 시작된 다산기지주변과 달리, 퇴적작용이 뒤늦게 일어난 지역이다. 고지형의 차이에 따른 퇴적 양상 및 시차를 밝히기 위한 암석 시료 채취하였다. 또한 다산기지에 비해 매우 잘 발달한 microcodium관찰 및 그 기원을 밝히기 위한 시료를 다량 채취하였다.

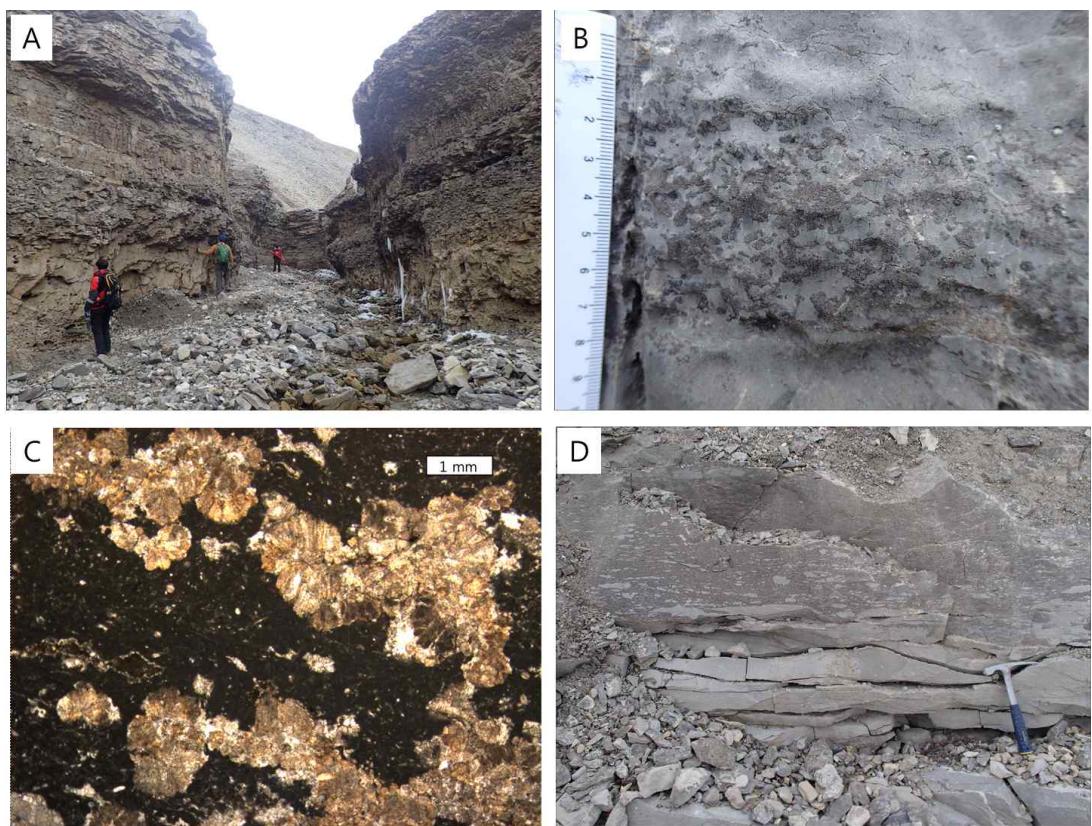


그림 3-48. Skansen 지역의 현장사진. (A) 주요 조사지역이었던 계곡의 노두들. (B) 마이크로코디움의 근접사진. (C) 마이크로코디움 박편사진. (D) 매우 조밀한 마이크로코디움을 보이는 석회암 노두

극지연구소

(2) Skansbukta 지역

이 지역은 폐름기 Voringen Member가 잘 발달한 지역으로, 다산기지에서 새로 발견한 해당 층원과의 비교연구를 위해 주상도 작성과 시료채취를 실시하였다(그림 3-49).

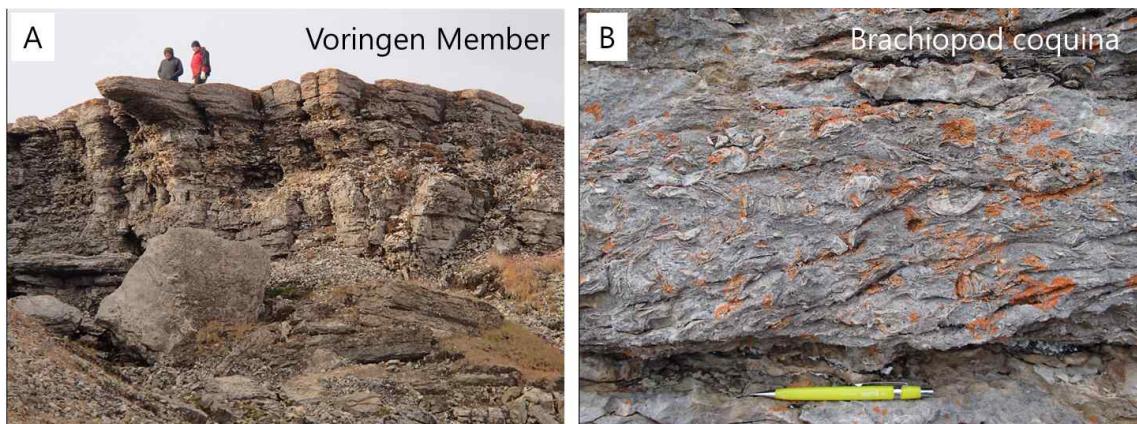


그림 3-49. Skansbukta 지역의 현장사진. (A) 주요 조사지역이었던 해안의 노두들. (B) Voringen 층원에 나타나는 특징적인 완족동물 골격이 집적된 퇴적암.

(3) Campbellryggen 지역

이 지역은 다산기지의 Tyrellfjellet 층원에서 발견되는 *palaeoaplysina* 퇴적체와 *fusulinid* 가 많이 포함된 Brucebyen Bed를 확인하기 위해 조사하였다(그림 3-50). 해당퇴적체들의 표식지와 가까운 곳이어서 다산기지 주변과의 비교연구가 필수적인 곳이다. Brucebyen Bed로 부터 다양한 *fusulinid* 시료를 채취해 Brucebyen Bed의 시간적 분포 파악을 위한 기초 재료를 확보했다. *Paleoaplysina* 생물초는 백운석화 작용과 규질화 작용을 많이 받아 미세구조가 잘 보존되지 않은 것으로 판단된다.

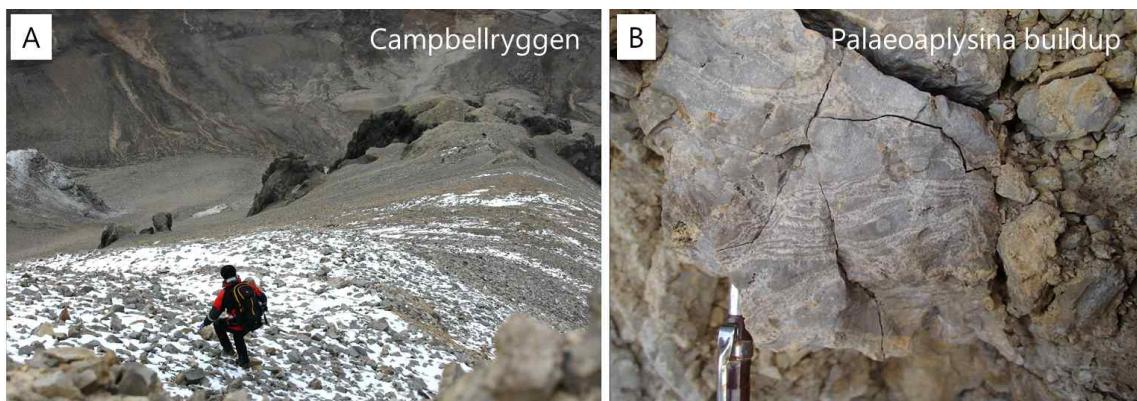


그림 3-50. Skansbukta 지역의 현장사진. (A) 주요 조사지역이었던 산사면의 노두. (B) *palaeoaplysina* 생물초 퇴적체.

6. 그린란드 고생대 지층 현장답사

북극지역 지질연구의 연구대상과 지역을 확장하기 위한 전략의 일환으로 북그린란드 전기 캠브리아기 지층이 산출되는 Sirius Passet에 대한 지질조사를 실시하였다. 조사지역의 Transitional Buen Formation에 대한 퇴적상 구분. 과상 세립사암과 다양한 셰일로 구분. 셰일은 내부구조에 따라 미세엽리셰일(finely laminated shale), 엽리셰일(laminated shale), 층리셰일(thinly bedded shale), 생교란을 받은 셰일(bioturbated shale)로 구분하였으며, 이에 대한 주상도를 작성하였다(그림 3-51).

캠브리아기 생물의 골격뿐 아니라 부드러운 부분도 화석화되어 산출되는 Sirius Passet 화석산출구간은 약 11 m이며, 가장 하부에는 50 cm두께의 과상 세립질 사암 또는 실트암이 위치한다. 가장 하부를 제외한 전구간이 mudstone으로 이루어져 있으며, 상부에 단층으로 접하는 석회암이 산출된다.

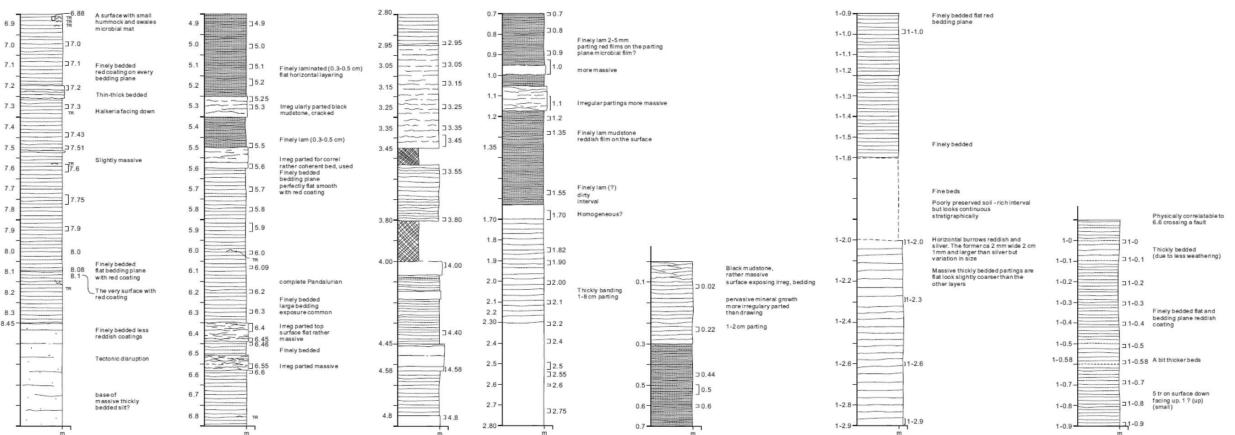


그림 3-51. 북그린란드 시리우스파셋 화석지의 주상도

세일에 산출되는 삼엽충이 일관되게 볼록한 쪽이 아래를 향하고 있어 화석산출지의 지층은 역전된 것으로 판단된다. 화석은 대부분 미세엽리세일 또는 엽리세일에서 집중적으로 산출되고 있다. 이들은 현장에서 두께 약 2-3 mm 까지 깨지지 않고 분리가 되며 그 사이에서 몸의 부드러운 부분이 인상으로 남거나 광화(mineralized)되거나, 탄소질 박막(carbonaceous film)의 형태로 화석이 산출된다. 많은 세일의 표면이 얇은 붉은 막으로 피복되어있고, 피복 하부에 화석이 산출되는 경우 화석과 피복사이에 동물이 지나간 생흔이 발달하기도 한다. 이 붉은 피복은 과거 미생물막이 보존된 것으로 생각되며, 과거 생물의 사체를 수층의 산소로부터 차단해 산화되지 않고 그대로 보존되는데 중요한 역할을 하였을 것으로 생각되고 있다.

극지연구소

제 4 절 스피츠베르겐섬 맨틀 포획암의 지구화학 특성연구

1. 서 론

맨틀 포획암은 암석권 맨틀의 지구화학적 특성뿐 아니라, 맨틀 내에서의 부분용융과정, 그로인해 진행되는 맨틀교대작용(metasomatism)과 부화과정(enrichment) 등의 암석권 맨틀 진화과정에 대한 직접적인 정보를 제공해준다.

스피츠베르겐은 스발바르군도 서측에 위치하며 제4기 화산활동에 의해 지표로 분출한 알칼리 현무암에는 다수의 맨틀포획암이 포함되어 있다(그림 3-52). 노르웨이 북쪽 북대서양과 유라시아 해양분지(Eurasian (Arctic) oceanic basins) 사이에 위치하고 있는 스발바르군도는 북대서양이 현재의 상태로 완전히 열리기 전까지는 그린란드와 인접하여 붙어 있는 로라시아 대륙의 일부였으나 백악기말-네오기 시기 동안의 유라시아판과 북아메리카판의 분리로 해양판의 확장이 진행되면서 현재의 위치에 자리잡게 되었다고 알려져 있다(Blythe & Kleinspehn, 1998, 그림 3-53). 따라서, 스발바르군도의 스피츠베르겐섬 맨틀포획암은 그린란드지역의 시생대 순상지 기반암을 관입한 초염기성암의 맨틀포획암이 보존하고 있는 지구형성 초기의 맨틀 성분에 대한 정보와 함께 올리고세 이후 해양판의 확장과정에서 발생한 암석권 맨틀 진화과정에 대한 정보를 모두 포함하고 있을 가능성이 높다. 또한 스피츠베르겐섬은 니포비치 해령(Knipovich Ridge)과 객켈 해령(Gakkel Ridge)에 가깝게 위치하고 있어 이 지역 대륙판을 뚫고 올라온 맨틀파편으로 볼 수 있는 스피츠베르겐 맨틀포획암의 암석권 맨틀진화과정에 대한 정보는 니포비치해령과 객켈 중앙해령 현무암이 유래한 맨틀의 지구화학적특성과 진화과정 해석에 중요한 정보를 제공해 줄 수 있다.

초기의 스피츠베르겐섬 맨틀포획암에 대한 선행 연구들은 이 포획암들의 이차적인 변성교대작용의 1) 프로세스, 2) 변성교대작용을 유발시키는 멜트-유체의 조성 규명, 그리고 3) 기원물질 추적을 위한 연구들이 주를 이루어왔다(Amunsen, 1987; Ionov et al., 1993, 1996, 2000a, b). 최근에 Choi et al. (2010)은 본 연구지역 맨틀포획암에 대한 Lu-Hf과 Re-Os 동위원소 분석을 통해 이 지역 암석권 맨틀의 형성시기를 고기 원생대/신기 시생대로 제시하였다. 그리고, 객켈해령 현무암에 나타나는 듀팔이상(DUPAL Anomaly) 특성의 근원물질로 로라시아 대륙판의 분열과정(break-up)에서 암석권 맨틀이 분리(delamination)되고 대류하는 맨틀 내에서 분산된 스발바르 암석권 맨틀을 듀팔이상(DUPAL Anomaly) 기원물질이라고 제시한 Goldstein et al. (2008)의 가설에 대해 재 고찰의 필요성을 제기하였다.

본 연구는 스피츠베르겐섬과 그린란드의 분리 전 공유하고 있었던 암석권맨틀 형성초기(고기 원생대/신기 시생대?)의 지구화학적 특성과 이후의 여러 차례 변성교대작용을 거치면서 변화한 맨틀의 지구화학특성 진화과정 복원에 중점을 두었다. 이를 위해 스베르피엘(Sverrfjell) 화산암체의 맨틀 폐리도타이트 시료들중 복합변성교대작용을 경험한 시료들에 대해 자세한 지구화학적 광물학적 연구를 수행하였다.

2. 지질환경 및 시료채취

스피츠베르겐은 북대서양 노르웨이 북쪽과 유라시아해 양분지 사이에 위치하는 스발바르에서 가장 큰 섬이다. 지구조환경 복원 연구결과에 따르면(그림 4-1), 스발바르는 백악기 말에 시작한 노르웨이와 그린란드 사이의 해양저 확장 및 대륙 분열이 시작되지 전까지는 그린란드와 인접해 있었다(Talwani and Eldhom, 1977; Johansen et al., 2005). 백알기 말-에오세 시기 동안 북대서양, 라브라도해, 그리고 유라시아 해양분지 사이의 중앙해령을 따라 로라시아 대륙이 분열한 과정은 스발바르 지역에 압축장의 지구조환경을 조성하였다(Tuchschmid and Spillmann, 1992). 초기 에오세 시기의 라브라도해 해저확장 중단으로 스발바르의 지구조환경은 다시 확장 환경으로 변하게 되었으며 그린란드와 스발바르사이의 해양저 확장은 니포비치해령을 따라 지속되었고 그 결과 약 10Ma 경에 북극해와 북대서양이 연결되었다(Eldholm et al., 1994; Blythe and Kleinspehn, 1998).

스피츠베르겐에는 네오세 용암류(lava flow)와 제4기 화산암체들의 화산활동이 보고되고 있다. 네오세 용암류는 대부분 서브알칼라인(subalkaline) 감람석 콜리아이트(olivine tholeiite)와 소량의 알칼리 현무암으로 구성된 반면 제 4기 화산암체들의 용암성분은 네펠린 바사나이트(nepheline basanite)/네펠린 하와이아이트(nepheline hawaiite) 성분들로 구성된다. 제4기 화산암체들의 형성은 에오세 초기부터 동북극분지(Eastern Arctic basin, Eurasian basin)와 그리란드해의 해양저 확장과정 동안의 신장응력 지구조 환경 하에서 분출한 것으로 알려져 있다(Jackson et al., 1894; Amundsen et al., 1987). 또한 N-S 방향의 스피츠베르겐 변환단층대를 따라 발달한 4기 화산암체들은 예르막 플라토(Yermak Plateau)와 나란히 산출되고 있는데(그림 4-2), 이는 이들의 발달과정과 형성시기가 지구조적으로 관련성이 있기 때문으로 해석되고 있다(Crane et al., 1982; Amundsen et al., 1987).

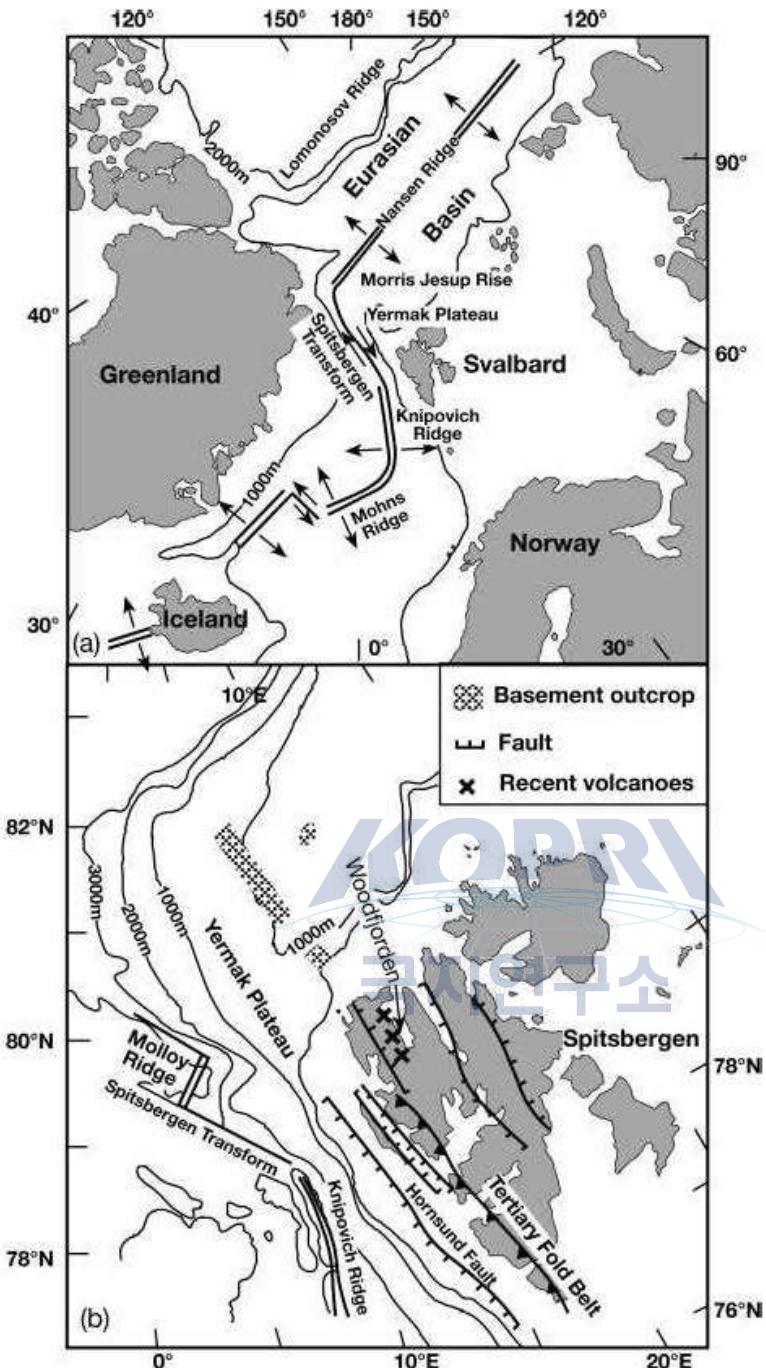


그림 4-1. 북대서양과 (a) 스발바르 군도의 위치와 (b) 맨틀포획암을 채취한 4기 알칼리 화산들의 분포와 주요 지구조 환경을 나타냄
(modified from Amundsen et al (1987).

제4기 화산활동은 북서쪽 스피츠베르겐섬의 복피요르드(Bockfjord) 지역의 브레이보겐 단층대(Breibogen falut zone)을 따라 발달하고 있으며 세 화산암체(Sverrfjell, Halvdanpiggen and Sigurdfjell)가 산출되고 있다(Amundsen et al., 1987; Ionov et al., 2002a, b). 브레이보겐 단층대는 NNW-SSE 방향이며, 단층대 좌우로 서측에는 중기 원생대 대리암과 편마암이 분포하고 동측에는 데본기 퇴적암이 산출된다. 세 화산암체들은 전 세계적으로 가장 많은 하부지각 및 맨틀포획암을 노출시키고 있는 지역으로 알려져 있다. 화산암 분출물의 약 15-20%가 상부맨틀 혹

은 하부지각으로부터 유래한 포획암으로 구성되며 맨틀 포획암의 조성 역시 매우 다양하게 산출되어 스피츠베르겐섬 하부의 맨틀 진화과정 뿐 아니라 전 지구적 맨틀의 진화과정 추적 연구에 매우 적합한 지역으로 간주되는 곳이다. 본 연구에서는 스베르피엘 화산암체의 맨틀포획암을 대상으로 연구를 진행하였다.

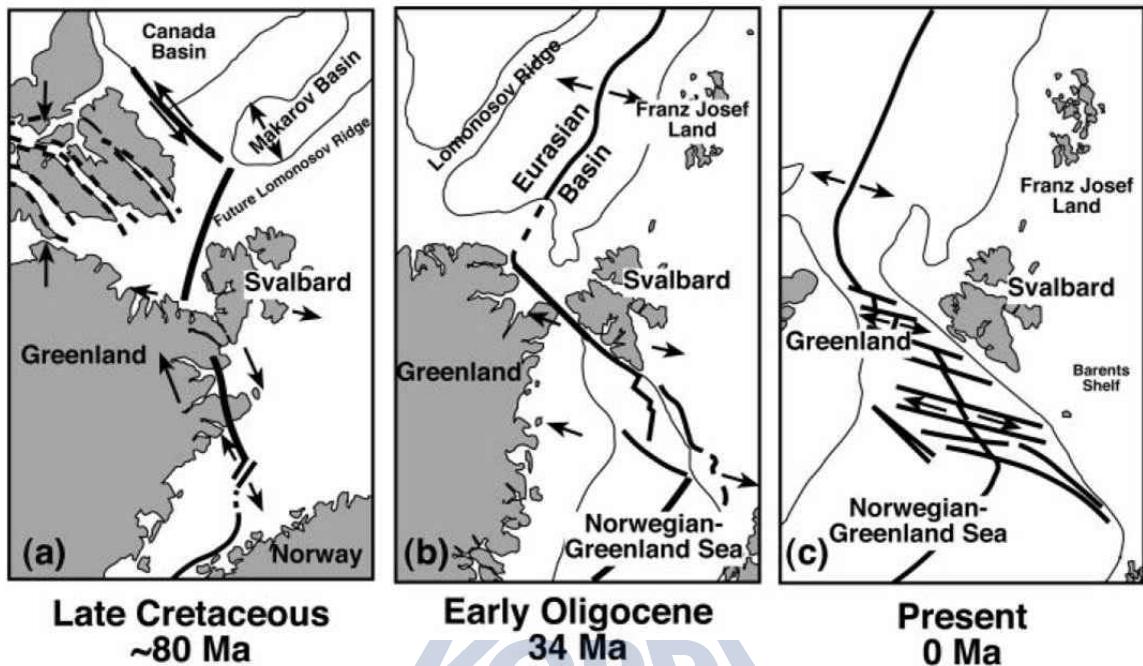


그림 4-2. 스발바르섬과 북서 대서양 지구조 환경복원 모델(modified from Blythe & Kleinspehn (1988). 굵은 선들은 주요 단층대를 나타낸다.

3. 스베르피엘(Sverrefjell) 맨틀포획암의 암석·지구화학적 특징

가. 암석학적 특징

스베르피엘 화산암체는 복피오르드 일대에 분출한 세 개의 제4기 화산암 중 가장 노두 상태가 양호한 것으로 알려져 있으며, 약 500m 높이, 3km 지름의 순상 화산체 모습이 일부 남아있으나(그림 4-3), 빙하기를 거치며 초기 화산암체 절반 이상이 침식에 의해 깎여져 나간 것으로 추정된다. 분출연대는 약 100,000-250,000년으로 보고되고 있다(Skjelkvale et al., 1989). 대부분의 맨틀 포획암은 스피넬 레르조라이트(spinel lherzolite), 스피넬 하츠버자이트(spinel hartzburgite)로 구성되며 일부 페리도타이트 시료에서 휘석이 풍부한 층(layer)이나 맥(vein)이 포함되는 시료들이 발견된다. 대부분의 페리도타이트 포획암은 금운모, 각섬석과 같은 함수 광물을 포함하지 않으나, 일부 시료에서 맨틀내의 교대변성작용의 결과로 만들어진 함수광물을 포함하는 시료가 관찰되는 것으로 보고되고 있다(Amunsen, 1987; Ionov et al., 1993, 1996, 2000a, b; Choi et al., 2010).

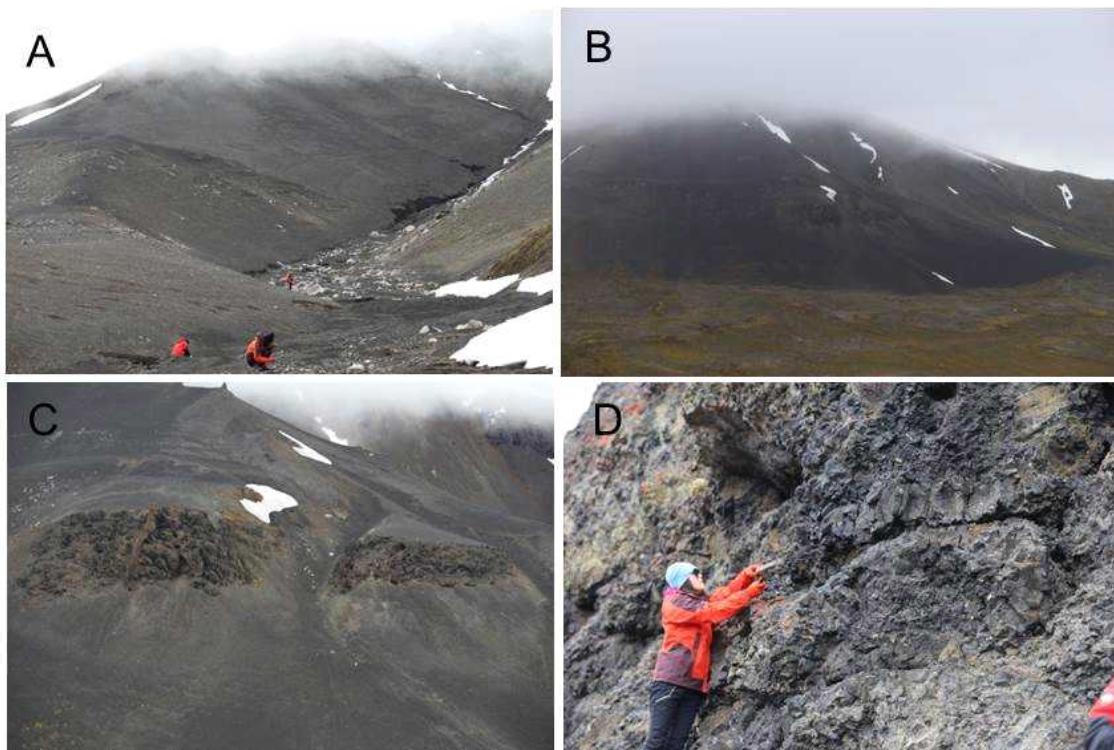


그림 4-3. 스베르피엘 화산암체 현장 조사. A) 스베르피엘 화산암체 주변의 모래 인지역에 맨틀포획암이 다수 발견됨, B) 성층화산암체의 일부 모양이 남아있는 스베르피엘 화산암체 전경, C),D) 스베르피엘 화산암체 중턱에서 발견되는 용암(lava flow)와 맨틀포획암.

본 연구를 위해 채취된 시료는 스피넬 레르조라이트, 하즈버자이트, 웹스터라이트 (Websterite) 등이다. 시료의 모드조성은 전암화학조성과 광물성분분석 결과를 바탕으로 계산되어진 것이다. 표4-1에 연구 시료의 암석종류와 모드조성비, 그리고 각 시료에 대한 평형온도 계산 결과를 표시하였다. 그림 4-4에 계산된 모드조성을 바탕으로 페리도타이트 시료분류 결과를 도시하였다.

스피츠베르겐 스베르피엘 레르조라이트 시료에 대해 양휘석 지온계(Wells, 1977; Brey and Köhler, 1990)를 활용하여 스피츠베르겐 스베르피엘 포획암의 평형온도를 계산한 결과는 840–950°C 범위를 보여준다. 레르조라이트와 하즈버자이트시료에 대해 계산된 결과는 큰 차이를 보이지 않는다.

맨틀 포획암이 유래한 평형온도를 계산할 수 있는 지온계와는 달리 압력을 계산할 수 있는 지압계는 매우 제한적이다. 기존의 연구에서(Amunsen et al., 1987) 석류석 웹스터라이트의 석류석-단사휘석 지압계와 지온계를 이용해 추정한 스피츠베르겐 맨틀의 온도-압력 추정곡선에 본 연구 시료에서 계산된 평형온도를 투영한 결과 9kb–11kb 범위의 압력에서 유래되었을 것으로 추정된다.

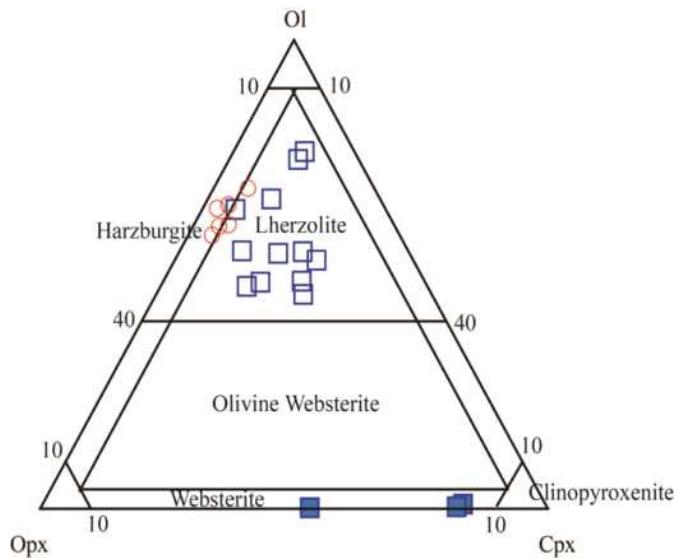


그림 4-4. 스베르피엘 맨틀포획암 분류.

표 4-1.

Table 1. Sverrefjell peridotite sample list and information summary.

Sample No.	Rock Type	Modes (wt%)				Equilibration Temperature (°C)	
		ol	opx	cpx	sp	Wells	Ca-opx
SVSL01	Sp. Lhz	53.7	27.9	13.3	5.1		
SVSL02	Sp. Lhz	51.4	30.2	13.6	4.8		
SVSL03	Sp. Lhz	51.1	29.8	15.1	4		
SVSL04	Sp. Lhz	64	20.4	12.6	3		
SVSL05	Sp. Lhz	60.2	24.8	11.8	3.2		
SVSL06	Sp. Lhz	63	21	13.1	2.9		
SVSL07	Sp. Lhz	60.5	27.8	9.4	2.3		
SVSL08	Sp. Lhz	62.2	21.4	11.1	5.3		
SVSL09	Sp. Lhz	65	22.8	9.9	2.3		
SVSL10	Sp. Lhz	63.9	25.3	9.1	1.7	840	895-910
SVSL11	Sp. Lhz	63.6	24.8	9.4	2.2		
SVSL12	Sp. Lhz	47.5	30.6	16.6	5.3		
SVSL13	Sp. Lhz	43.2	32.7	17.4	6.7		850
SVSL14	Sp. Lhz	54.1	27.7	12.9	5.3		
SVSL15	Sp. Lhz	50.3	20	23.6	6.1		
SVSL16	Sp. Lhz	60.4	26.4	11.2	2	910	940
SVSL17	Sp. Lhz	58.4	26	11.6	4		
SVSL18	Sp. Lhz	60.8	27.5	8	3.7		
SVSL19	Sp. Lhz	49.5	33.4	12.2	4.9		
SVSL20	Sp. Lhz	65.7	21.3	10.2	2.8	870	900
SVSL21	Sp. Lhz	76.4	9	13.2	1.4	895	950
SVSL22	Sp. Lhz	51.6	30.8	14	3.6		
SVSL23	Sp. Lhz	44.7	36	14.9	4.4		
SVPY01	Ol. Web	17.2	30.1	46	6.7		
SVPY02	Web	1	38	54.9	7		
SVPY03	Web	1.2	38.8	58.1	11.9		
SVPY04	Web	1.3	41.4	48.7	9.5		
SVSH01	Sp. Hartz	77.8	18.1	3.4	0.7	940	887
SVSH02	Sp. Hartz	77.2	14.6	6.7	1.5		
SVSH03	Sp. Hartz	71.5	22.7	5.2	0.6		
SVSH04	Sp. Hartz	66.4	26.2	5.8	1.6		
SVSH05	Sp. Hartz	78.5	13.1	5.2	3.2		
SVSH06	Sp. Hartz	69.9	25.1	4.3	0.7		

Equilibration temperatures were estimated by two-pyroxene thermometer of Wells (1977), and Ca-Opx method of Brey & Kohler (1990).

Modal compositions were calculated from whole-rock and mineral compositions by least-squares method.

Abbreviations: Sp.Lhz = spinel lherzolite; Sp.Hartz = spinel harzburgite; ol = olivine; opx = orthopyroxene; cpx = clinopyroxene; Sp = spinel.

나. 분석방법 및 결과

맨틀 포획암의 전암조성을 분석하기 위해 시료의 중앙부분을 절단하여 약 30g 정도의 분말 시료를 만들었다. 이차적인 변성작용 및 교대작용의 간섭을 배제하기 위해서 전암 분말이 아닌 광물분리를 통해 동위원소 조성을 분석하였다. Sr-Nd-Pb 동위원소 조성 분석을 위해서 페리도타이트 시료의 광물을 중 희토류원소 및 미량원소를 가장 많이 함유하고 있는 단사휘석을 분리하여 실험을 수행하였다. 암석분말시료 제작 및 전암 주성분 및 미량원소, Sr-Nd-Pb 동위원소 분석을 위한 실험과정은 Lee et al. (2011)에 자세히 기재되어 있다.

전암 주성분 원소 및 미량원소, 동위원소 분석은 극지연구소 지구시스템연구부에 설치된 XRF(PANalytical Axiosmax), 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Elan 6100), 열이온화 질량분석기(TIMS, TRITON)을 이용하였다. 또한, 광물의 주성분 및 미량원소 조성분석과 이미지 분석을 위해서 극지연구소의 FE EPMA(JEOL JXA-8530F), LA-ICPMS, SEM(JEOL JSM6610) 등의 분석 장비를 활용하였다. 분석결과는 표4-2와 표4-3에 정리되어 있다.



Table 2. Whole rock compositions of the Sverrefjell mantle peridotites.

Rock Type	Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	Total
Lherzolite	SVSL09	43.90	0.08	2.17	8.25	0.13	42.22	2.08	0.29	0.02	0.05	101.23
Websterite	SVPY02	49.99	0.71	7.58	6.43	0.13	21.29	11.28	1.40	0.11	0.25	100.22
Lherzolite	SVSL12	44.23	0.36	3.83	8.12	0.13	37.14	3.17	0.80	0.10	0.28	100.34
Westerite	SVPY03	47.96	0.30	11.09	5.74	0.11	22.12	10.58	0.98	0.04	0.12	100.16
Lherzolite	SVPY03	42.71	0.06	1.52	7.72	0.12	45.20	1.44	0.23	0.01	0.02	100.12
Lherzolite	SVSL15	43.13	0.25	4.25	7.77	0.13	36.25	4.59	0.71	0.08	0.19	99.61
Lherzolite	SVSL16	44.57	0.03	2.02	8.39	0.13	41.04	2.24	0.33	0.01	0.03	100.84
Lherzolite	SVSH03	44.06	0.04	1.18	7.75	0.12	44.58	1.09	0.21	0.00	0.02	100.55
Lherzolite	SVSL21	42.72	0.11	1.54	7.89	0.12	43.85	2.84	0.48	0.05	0.17	100.84
Lherzolite	SVSL03	44.74	0.15	3.45	8.17	0.13	38.54	3.16	0.41	0.02	0.05	100.67
Lherzolite	SVSL04	43.30	0.08	2.19	8.09	0.13	41.12	2.35	0.31	0.02	0.03	100.56
Lherzolite	SVPY01	47.31	0.27	6.53	6.44	0.13	27.08	9.97	0.90	0.06	0.12	99.76
Lherzolite	SVSL05	44.03	0.12	2.81	8.33	0.13	40.88	2.49	0.45	0.02	0.06	101.07
Lherzolite	SVSL06	43.74	0.11	2.62	7.78	0.12	41.28	2.77	0.34	0.01	0.02	100.31
Lherzolite	SVSH01	43.04	0.04	0.75	8.62	0.12	45.69	0.64	0.18	0.01	0.02	100.57
Lherzolite	SVSL07	44.32	0.21	1.97	8.30	0.14	41.21	1.72	0.55	0.09	0.19	100.39
Lherzolite	SVSL22	45.00	0.24	3.42	7.62	0.12	39.12	3.02	0.70	0.09	0.22	100.99
Lherzolite	SVSH06	44.32	0.08	1.39	7.84	0.12	44.52	0.98	0.34	0.04	0.09	100.81
Lherzolite	SVSL23	45.24	0.45	3.54	8.26	0.13	37.14	2.87	0.96	0.17	0.40	100.52
Lherzolite	SVSL10	44.43	0.12	2.02	7.97	0.13	42.34	1.93	0.42	0.05	0.11	100.90
Websterite	SVSL11	44.18	0.17	2.28	7.84	0.12	42.19	2.01	0.45	0.05	0.13	100.83
Lherzolite	SVSL08	42.42	0.20	2.69	10.93	0.16	39.74	2.25	0.44	0.05	0.08	99.84
Lherzolite	SVSL13	44.34	0.32	4.37	9.21	0.15	35.84	4.01	0.75	0.07	0.14	100.32
Lherzolite	SVPY04	48.68	0.28	7.74	5.53	0.13	22.93	11.90	1.00	0.07	0.11	99.10
Lherzolite	SVSL14	43.52	0.30	3.07	9.69	0.15	38.33	2.69	0.71	0.08	0.18	99.67
Lherzolite	SVSL17	43.78	0.13	2.60	8.88	0.14	39.78	2.51	0.52	0.05	0.12	100.06
Lherzolite	SVSL18	43.64	0.32	2.17	9.60	0.15	40.63	1.55	0.73	0.09	0.26	101.41
Lherzolite	SVSL19	44.52	0.42	3.33	8.49	0.14	38.14	2.65	1.01	0.15	0.35	100.76
Lherzolite	SVSL20	43.74	0.11	2.27	8.53	0.14	41.87	2.49	0.42	0.02	0.02	101.56
Harzburgite	SVSL01	43.91	0.22	3.43	9.06	0.15	38.66	3.05	0.66	0.09	0.13	100.48
Harzburgite	SVSL02	44.30	0.24	3.15	8.87	0.15	38.16	3.02	0.66	0.06	0.16	100.56
Harzburgite	SVSH04	44.26	0.06	1.36	8.66	0.15	42.68	1.21	0.37	0.04	0.07	100.55
Harzburgite	SVSH05	41.86	0.19	2.25	8.20	0.13	44.97	1.28	0.56	0.07	0.14	101.89

Table 3. Trace element compositions of the Sverrefjell mantle peridotites.

Rock Type	Sample	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Rb	Y	Th	Nb	Gs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Pb	Th	U			
Sp-Htz	SVSL09	0.1	7.3	47.7	1602	133	1881	1.6	37	1.6	5.9	1.1	0.3	17.4	2.1	3.0	0.3	1.2	0.3	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0	0.4	0.1	0.0	0.86	0.3	0.3	0.1					
Web	SPV02	0.3	30.4	150.6	2648	81	993	5.5	258	12.5	46.9	7.6	0.1	161.6	12.5	17.7	1.8	7.8	2.2	0.8	2.4	2.6	0.5	1.4	0.2	1.2	0.2	1.8	0.5	105.3	1.0	1.6	0.4			
Sp-Htz	SVSL12	0.3	8.7	65.8	2558	121	1755	6.6	135	3.5	28.7	8.1	0.4	95.4	6.6	12.4	1.3	5.1	1.0	0.4	1.0	1.9	0.1	0.8	0.1	0.4	0.1	0.3	0.0	1.0	0.5	73.4	0.9	0.8	0.2	
Web	SPV03	0.1	27.6	119.0	2785	65	676	2.5	133	4.1	26.0	3.4	0.1	44.1	6.2	8.6	1.0	4.1	1.0	0.4	1.0	1.0	0.1	0.9	0.2	0.5	0.1	0.4	0.1	0.9	0.3	35.8	0.7	1.0	0.4	
Sp-Htz	SVSH02	0.0	8.8	43.2	4199	137	1889	0.4	13	1.1	7.2	0.1	0.1	3.8	0.4	1.2	0.2	1.1	0.3	0.1	0.2	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.7	0.0	105.2	0.2	0.1	0.0			
Sp-Htz	SVSL15	0.2	15.3	57.2	2307	115	2104	5.6	155	3.7	22.3	7.4	0.5	104.3	8.9	17.2	1.9	6.6	1.1	0.4	1.1	1.9	0.1	0.8	0.1	0.4	0.1	0.3	0.0	0.7	0.4	24.0	0.7	1.1	0.3	
Sp-Htz	SVSL16	0.1	10.3	41.1	1544	125	1983	0.8	13	1.1	0.2	0.2	0.5	5.3	0.5	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sp-Htz	SVSH03	0.0	6.4	28.2	1438	123	2299	0.5	8	0.6	1.3	0.1	0.2	0.4	0.1	0.3	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sp-Htz	SVSL21	0.1	6.4	33.1	1492	126	2379	3.4	98	2.5	8.9	7.6	0.2	90.6	3.8	8.6	1.1	4.9	1.9	0.4	0.8	0.1	0.6	0.1	0.3	0.0	0.2	0.0	0.4	0.4	28.2	0.5	0.4	0.1		
Sp-Htz	SVSL03	0.0	12.3	53.3	1541	120	2026	1.1	19	2.9	6.5	0.8	0.1	10.9	0.8	1.6	0.2	1.0	0.3	0.1	0.4	0.4	0.1	0.5	0.1	0.4	0.1	0.3	0.1	0.4	0.1	39.7	0.1	0.1	0.0	
Sp-Htz	SVSL04	0.0	11.4	44.1	2177	130	2216	1.0	40	1.8	22	0.2	0.3	20.3	2.4	4.5	0.4	1.4	0.2	0.1	0.3	0.0	0.3	0.1	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	61.7	0.3	0.3	0.1		
Web	SPV04	0.1	31.3	111.2	4879	92	1221	2.5	120	5.2	17.2	2.9	0.1	81.2	8.5	12.6	1.2	4.4	0.9	0.4	1.1	1.0	0.2	0.6	0.1	0.6	0.1	0.9	0.2	64.7	0.6	1.1	0.3			
Sp-Htz	SVSL05	0.1	12.0	46.8	1822	119	2083	1.2	33	2.4	6.7	1.1	0.2	15.9	1.4	2.6	0.3	1.2	0.3	0.1	0.4	0.1	0.4	0.1	0.3	0.0	0.3	0.0	0.4	0.1	32.0	0.2	0.2	0.1		
Sp-Htz	SVSL06	0.0	12.8	50.4	2234	109	2069	0.2	10	2.3	3.7	0.1	0.0	0.6	0.1	0.4	0.1	0.5	0.2	0.1	0.3	0.1	0.4	0.1	0.3	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	
Sp-Htz	SVSH01	0.0	3.9	20.4	1662	135	2375	0.5	6	0.3	2.6	0.2	0.1	3.2	0.2	0.4	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Sp-Htz	SVSL07	0.2	8.0	30.7	2017	122	2085	4.7	103	2.3	21.2	6.2	0.2	83.2	6.3	10.8	1.2	4.4	0.9	0.3	0.8	0.7	0.1	0.5	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0	0.7	0.4	46.9	0.5	0.8	0.2	
Sp-Htz	SVSL22	0.3	13.0	44.6	2553	110	1972	5.0	121	2.8	19.7	6.4	0.2	91.2	7.5	11.6	1.1	3.8	0.7	0.3	0.7	0.1	0.6	0.1	0.3	0.0	0.3	0.0	0.7	0.4	34.1	0.6	1.1	0.3		
Sp-Htz	SVSH06	0.1	8.2	33.5	3210	193	3273	2.9	64	1.4	12.9	3.2	0.3	45.7	4.0	6.8	0.7	2.5	0.5	0.1	0.4	0.1	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.9	0.2	95.1	0.4	0.5	0.1		
Sp-Htz	SVSL23	0.5	6.9	43.1	2208	112	1898	9.5	198	4.2	41.3	13.0	0.3	185.5	13.0	21.1	2.1	7.8	1.5	0.5	1.4	0.2	0.0	0.1	0.3	0.0	1.3	0.8	49.1	1.1	1.7	0.4				

다. 전암 및 광물 지구화학 조성

연구시료인 스베르피엘 화산암체의 페리도타이트의 전암 Mg#는 89~92 범위이다(표4-2). 페리도타이트 시료들의 현무암질 액의 분화경향을 살펴보기 위해서 MgO 함량에 따른 대표적인 주성분원소 함량변화와 불호정성 미량원소 변화도와 희토류원소 패턴을 그림 4-5와 그림 4-6에 도시하였다.

이차교대변성작용의 영향은 주로 단사휘석의 성분에 가장 많이 중첩되어 반영되기 때문에 단사휘석의 희토류원소 패턴을 기준으로 스베르피엘 맨틀 포획암을 아래와 같이 4개의 그룹으로 분류하였다.

- 1) 경희토류원소(LREEs)가 결핍되거나 또는 플랫한 패턴을 보이는 그룹(La_N/Ce_N 0.39~1.26; Ce_N/Yb_N 0.29~0.63; Sm_N/Yb_N 0.75~1.07, Type 1),
- 2) 스푼형태의 패턴을 보이는, 중희토류원소(MREEs)가 부화된 특징을 보이는 그룹(La_N/Ce_N 1.26~2.85; Ce_N/Yb_N 1.43~7.74; Sm_N/Yb_N 1.21~2.80, Type 2),
- 3) LREEs의 부화가 매우 두드러져 LREE/HREE 비가 매우 높은 그룹(La_N/Ce_N 0.83~1.24; Ce_N/Yb_N 5.57~24.68; Sm_N/Yb_N 1.30~6.60, Type 3),
- 4) LREEs는 부화되고 MREEs는 결핍된 U-shape 패턴을 보이는 그룹(La_N/Ce_N 1.92~2.02; Ce_N/Yb_N 4.53~5.29; Sm_N/Yb_N 0.35~0.49, Type 4)

전암 화학조성은 부화의 정도를 지시하는 주성분원소인 Al_2O_3 , CaO , TiO_2 , 그리고, Na_2O 함량은 MgO 함량 감소에 따라 웹스터라이트, 레르조라이트, 하즈버자이트 시료의 순으로 감소하는 패턴을 보여준다(그림 4-5). 경희토류원소와 불호정성 미량원소(imcompatible trace elements) 함량 또한, 웹스터라이트, 레르조라이트, 결핍된 하즈버자이트 시료의 순으로 점차적으로 감소하는 경향을 보인다(그림 4-6, 4-7). 이러한 원소들은 일반적으로 이차 변성교대작용의 영향으로 부화되는 특징을 보이는 원소들이기 때문에 연구지역 페리도타이트 시료들은 하즈버자이트, 레르조라이트, 웹스터라이트 순으로 이차 교대변성작용의 영향을 많이 받은 것으로 해석 할 수 있다.

Type 1 시료들은 맨틀 내에서의 용융과정 등으로 발생되는 이차 변성교대작용에 의한 미량원소의 부화 경향은 거의 보이지 않는다. 즉, 암석권 맨틀의 형성과정에서 현무암질 마그마가 빠져나가고 남은 초기 결핍된 맨틀조성의 특징을 그대로 보존하고 있다. 한편, 섭입작용으로 유입된 유체 혹은 멜트의 영향을 받은 변성교대작용의 증거를 보이는 Type 4 페리도타이트 시료들이 가장 많이 부화된 특성을 보인다(그림 4-6, 4-7).

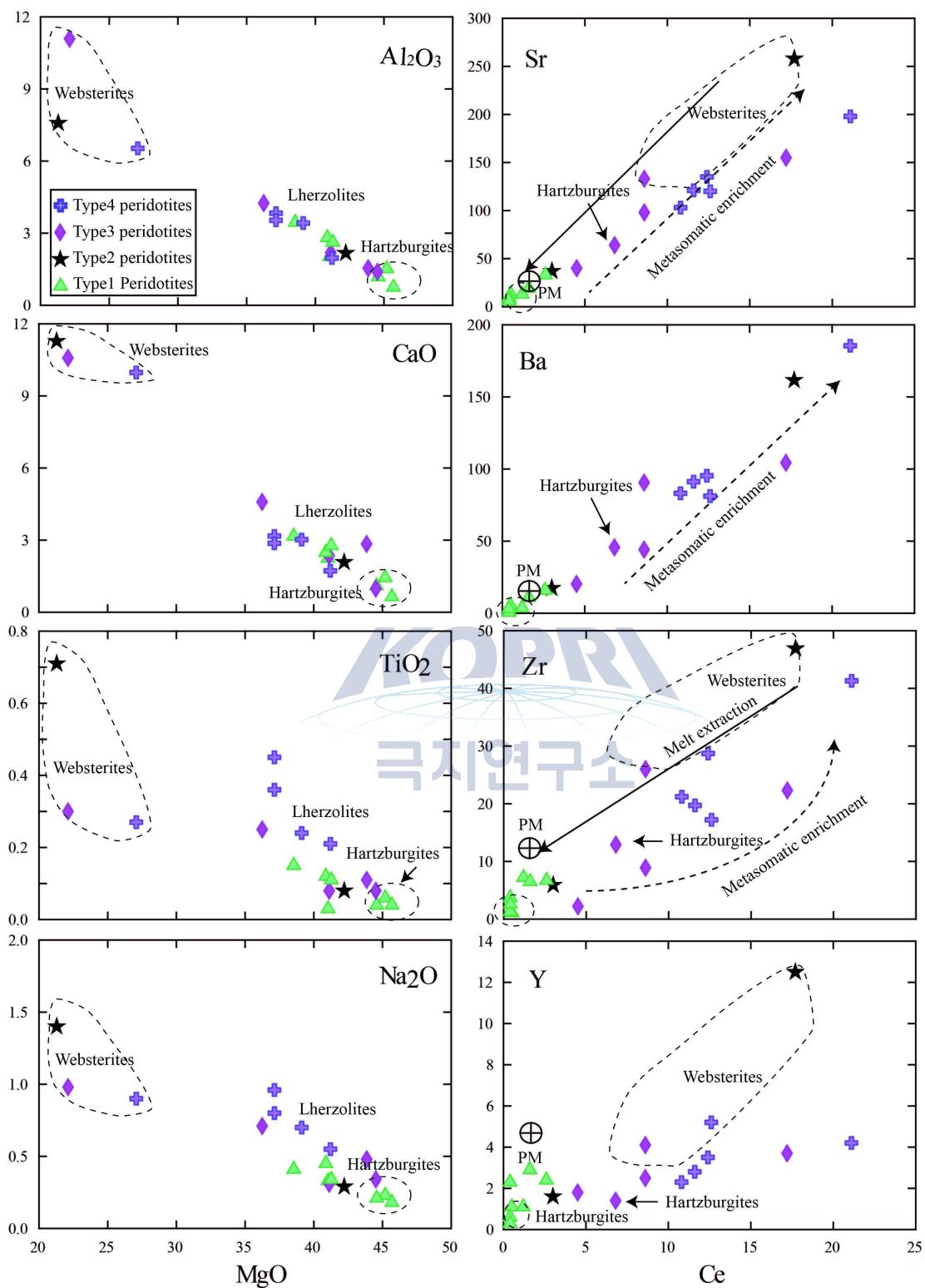


그림 4-5. 스베르피엘 맨틀 포획암 전암성분 변화도.

Sun+McDon. 1989-REEs

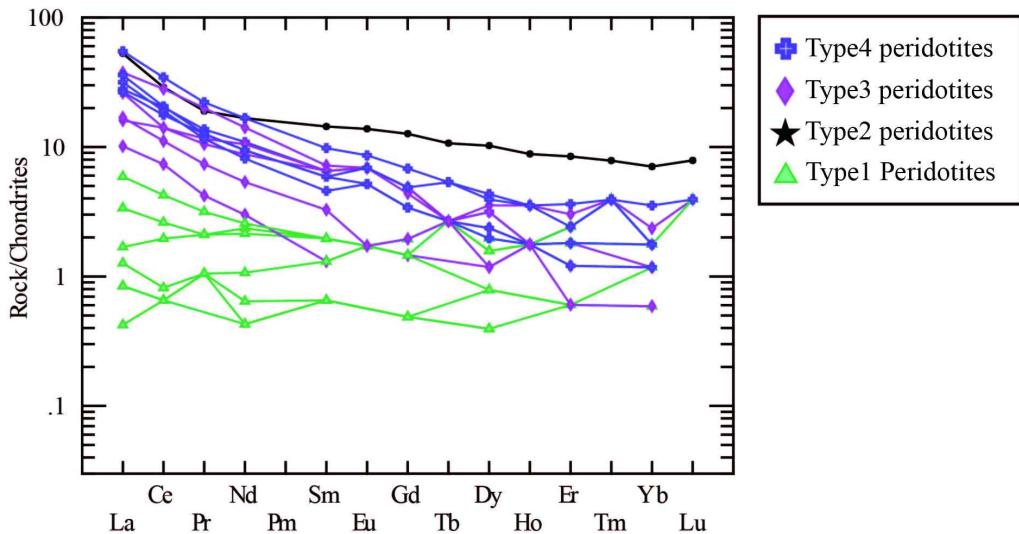


그림 4-6.. 스베르피엘 맨틀 포획암 희토류원소 패턴

그림 4-6, 4-7, 4-8, 4-9에 대표적인 단사휘석의 주성분원소, 미량원소 희토류원소 조성패턴을 도시하였다.

Type 3 단사휘석들은 카보네이트 벨트와 반응한 미량원소 특성을 보여준다. Type 4 단사휘석들은 특징적으로 U, Th, Pb 함량이 상당히 높으며, U-shape의 희토류원소 패턴을 보여주는데, 이는 섭입과정에서 유입되거나 발생한 hydrous fluid 혹은 silicate melt의 영향을 지시하는 것으로 해석된다.

극지연구소

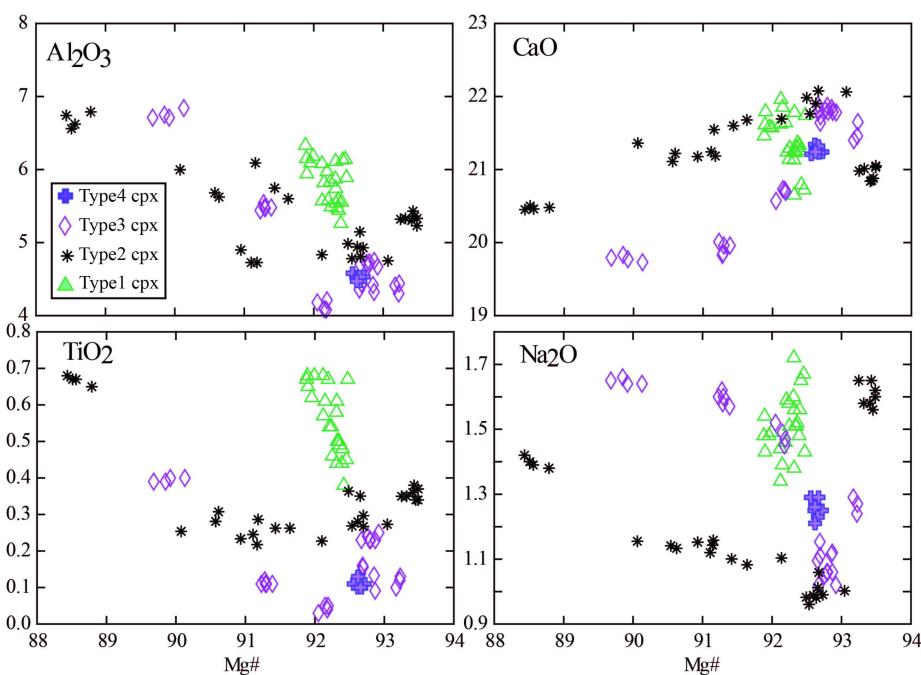


그림 4-7. 스베르피엘 맨틀 포획암 단사휘석 유형별 주성분원소 성분 변화도.

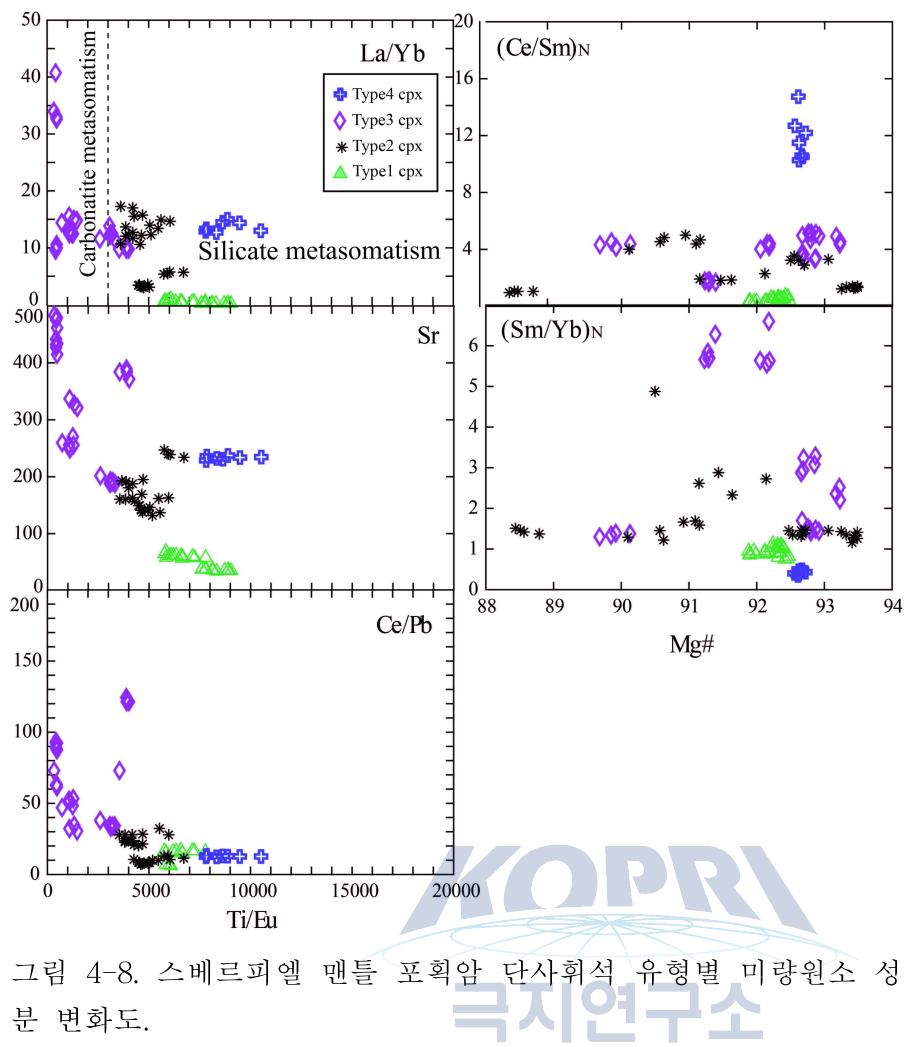


그림 4-8. 스베르피엘 맨틀 포획암 단사회석 유형별 미량원소 성분 변화도.

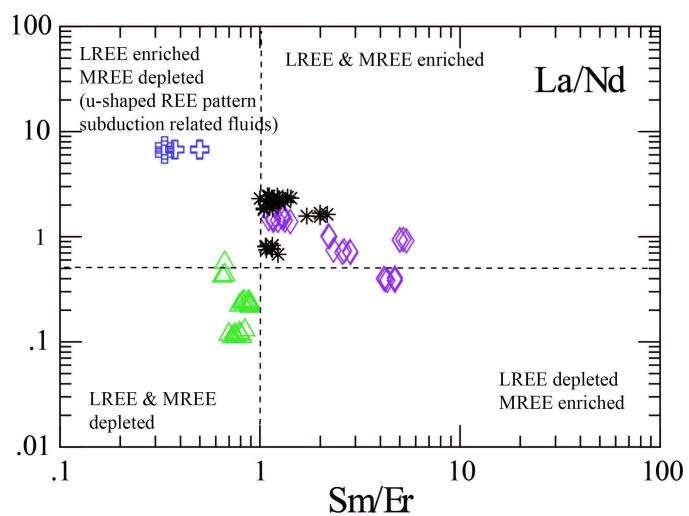


그림 4-9. 스베르피엘 맨틀 포획암의 경희토류 (LREEs)와 중희토류(MREEs) 성분 변화도. type 4 단사회석의 서브덕션관련 유체에서 유래한 희토류원소 특성을 엿볼 수 있다.

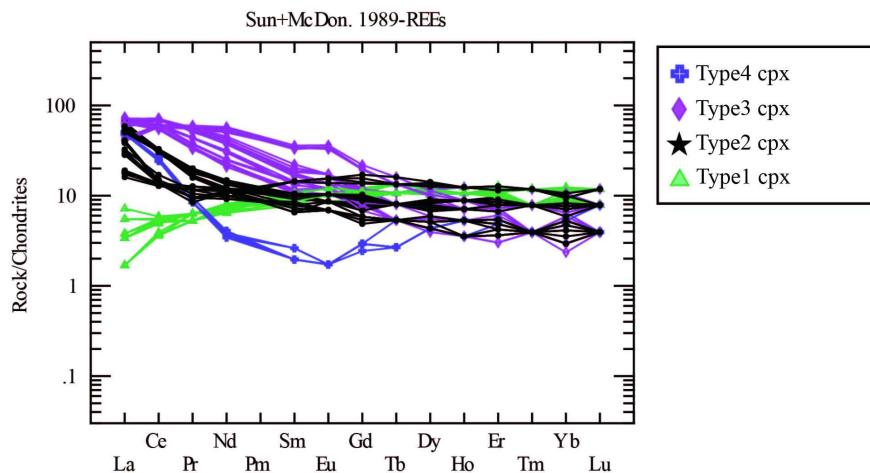


그림 4-10. 스베르피엘 맨틀 포획암 단사휘석 유형별 희토류원소 패턴.

라. Sr-Nd-Pb 동위원소 조성

대표적인 레르조라이트(lherzolites), 하즈버자이트(hartzburgites), 웹스터라이트(websterites) 맨틀포획암 시료에 대한 단사휘석 Sr-Nd-Pb 동위원소 조성 분석 및 결과를 표4-4에 정리하고 그림 4-9과 4-10에 도시하였다.

표4-4



Table 4. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of clinopyroxenes from Sverrefjelle peridotites.

Rock type	Sample	cpx type	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2 δ	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 δ	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 δ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 δ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 δ
Web	SVPY02	4	0.513129	5	0.703895	5	18.4108	15	15.5155	14	38.3684	43
Sp. Lhz	SVSL10	2	0.512828	4	0.703881	5	18.1834	14	15.5017	14	38.2154	42
Sp. Lhz	SVSL11	3	0.512979	6	0.703527	6	18.5073	19	15.5181	18	38.4676	56
Sp. Lhz	SVSL13	1	0.513321	11	0.702020	15	17.5957	141	15.3945	138	36.9931	52
Web	SVPY03	3	0.512809	7	0.703293	5	18.3805	13	15.4889	12	38.2644	39
Sp. Lhz	SVSL16	1	0.513421	11	0.702032	9	17.9471	43	15.4054	41	37.5878	85
Sp. Lhz	SVSL20	1	0.513230	14	0.702415	5	18.1678	61	15.4616	58	37.7867	78
Sp.Hartz	SVSH03	3	0.512266	6	0.705316	8	16.9065	26	15.2728	26	36.7309	78
Sp. Lhz	SVSL21	2	0.512853	8	0.704088	8	18.4465	16	15.5000	15	38.4238	46
Sp.Hartz	SVSH04	2	0.512552	6	0.704192	4	18.2872	20	15.4840	19	38.3210	60
Sp. Lhz	SVSL22	4	0.512853	11	0.704248	5	18.3248	16	15.4964	15	38.3326	48
Sp.Hartz	SVSH06	2	0.512906	9	0.703609	5	18.3697	20	15.4919	19	38.2755	59
Sp. Lhz	SVSL03	1	0.513321	9	0.702250	5	17.8257	361	15.3968	348	37.2995	60
Sp.Hartz	SVSH01	4	0.513043	15	0.702332	5	18.1625	63	15.4141	60	37.4988	65

Abbreviations: Sp.Lhz = spinel lherzolite; Sp.Hartz = spinel harzburgite; Web = webstrite.

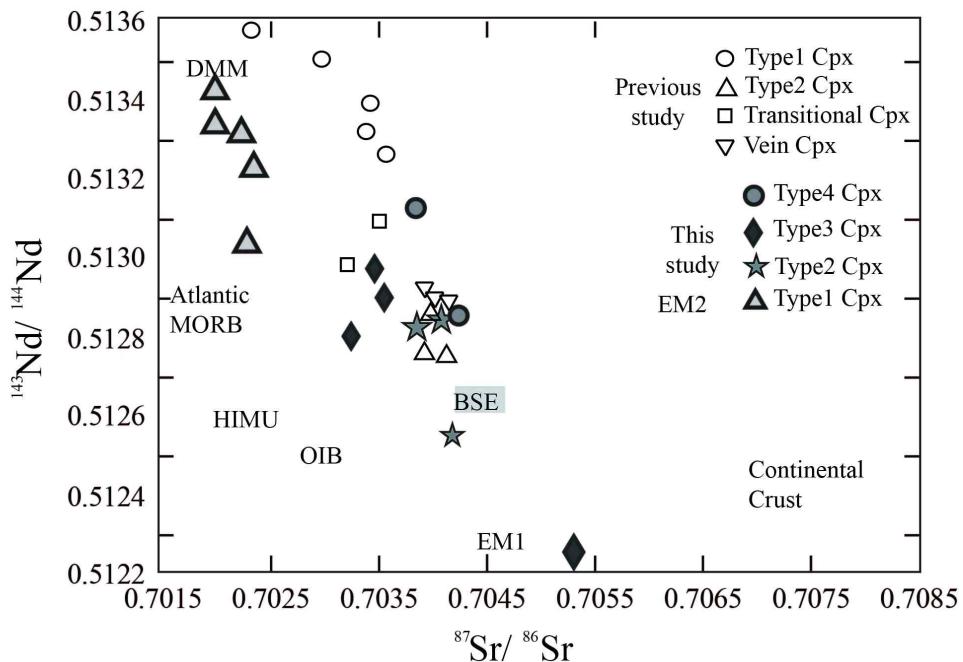


그림 4-11. 스베르피엘 맨틀포획암 단사휘석의 Sr-Nd 동위원소 조성.
스베르피엘 맨틀포획암 선행연구 결과를 함께 도시함.

4. 토의 및 결론

기존의 주 연구된 스베르피엘 맨틀포획암은 레르조라이트시료와 하츠버자이트 시료가 주를 이루었지만, 2014년 현장조사를 통해 5개의 웹스터라이트 시료를 확보하였다. 반복적인 맨틀 변성교대작용의 증거를 잘 보존하는 것으로 알려져 있는 웹스터라이트 부분을 포함한 복합 맨틀 페리도타이트(웹스터라이트+하즈버자이트, 혹은 웹스터라이트+레르조라이트)와 다수의 하즈 버자이트, 레르조라이트 시료에 대해 이차 변성교대작용의 증거를 찾기 위해 현미경 관찰과 맨틀포획암 광물 중 희토류 성분 및 미량원소 성분을 대부분 포함하는 것으로 알려진 단사휘석들에 대해 LA-ICPMS 분석을 통해 정밀 미량원소 조성을 획득하였다.

스베르피엘 맨틀포획암 단사휘석의 미량원소 및 희토류조성 분석 결과에 따르면 웹스터라이트 시료의 단사휘석에서 미량원소 조성변화가 가장 두드러지게 관찰된다. 맨틀에서 발생된 소규모 카보나타이트 멜트에 의한 교대작용의 결과로 1) 경희토류원소(Light Rare Earth Elements, LREE)의 부화가 두드러진 단사휘석과 2) 서브덕션으로 유발된 멜트 혹은 유체에 의한 변성교대작용의 결과로 경희토류는 부화되고 중희토류(Middle Rare earth elements MLEE)가 결핍된 U-shape의 희토류 패턴을 보이는 단사휘석이 발견되었다(그림 3.4-60). 스피츠베르겐 맨틀포획암 연구 결과 중 서브덕션관련 유체에 의한 맨틀교대작용의 증거는 처음 발견된 연구결과이다. 향후 이러한 서브덕션 관련 유체로 인한 맨틀교대작용의 시기를 규정할 수 있는 동위원소시스템을 이용하여 교대변성작용의 연대를 구하고 관련 지구조 환경을 해석할 필요가 있다.

스베르피엘 맨틀포획암 단사휘석의 Sr-Nd-Pb 동위원소 조성을 살펴보면 가장 결핍된 특성을 보이는 Type 1 페리도타이트는 이차적인 변성교대작용을 거의 받지 않은 암석권맨틀의 형

성과정에서 현무암질 마그마를 뿜어내고 남은 맨틀인 결핍된 맨틀의 동위원소 특성을 그대로 보여준다. Type 2와 3의 단사휘석의 Sr-Nd 동위원소 특성 또한 일반적인 맨틀의 동위원소 진화과정에서 나타나는 조성범위(mantle array)에 도시된다. 반면에 서브덕션관련 유체에 의한 변성교대작용의 영향을 받았다고 생각되는 Type 4 단사휘석의 경우는 맨틀의 동위원소 조성 범위(mantle array)에서 오른쪽으로 벗어난 특성을 보이는데, 이는 맨틀 변성교대작용 과정에서 비슷한 불호정성을 가지는 원소들이 원소별로 선별적으로 부화되었던 프로세스가 있었던 것으로 해석된다. 부화된 소스물질(EM 맨틀)과의 일반적인 혼합(mixing) 과정으로는 이러한 조성을 설명할 수 없다. 즉 비슷한 불호정성 정도(degree of incompatibility)를 가지는 Sr과 Nd 원소의 부화정도(degree of enrichment)를 다르게 만든 분별과정(fractionation)이 있었을 것으로 생각된다. 이차교대작용을 유발시키는 멜트가 결핍된 페리도타이트와 반응할 때 페리도타이트 전암의 조성과 각각의 고유 광물조합들이 차이가 이러한 분별작용(fractionation)을 일으킬 것이라고 생각된다. 분별작용의 정도(degree of fractionation) 또한 주변 페리도타이트의 조성과 광물조합에 영향을 받을 것으로 생각된다.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

가. 연구기간 :총 3년 (2014.01.01. ~ 2016.12.31.)

나. 목표 달성도

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성을(%)					
구분	연차별 달성내용			연차별 계획대비 연구실적 달성을(B) (%)	
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2014)	1. 중앙로벤빙하 후퇴 지역 식생분포 조사 및 토양 시료 샘플링	1-1. 300개의 연구지점에 서 식생 조사 및 토양 시료 샘플링 1-2. 정밀한 DEM작성을 위한 항공사진 촬영	0.45	<ul style="list-style-type: none"> · 총화표본추출법 이용하여 조사 지점 선정 · 식생조사 129개 지점 · 토양샘플링 54개 지점 · 무인항공기 임차계획이 무산되어 항공사진 촬영 취소, 대신 인공위 성 사진 확보 	95
	2. 중앙로벤빙하 후퇴 지역 대기 관측전략 수립	2-1. 한-프랑스-독일 공 동 대기 관측 전략 수 립	0.05	<ul style="list-style-type: none"> · 2015년 식생 샘플링 지역 대상으 로 CO₂ 수동챔버 운영 계획 수립 	100
	3. 다산기지 주변 고생대 층서 규명	3-1. 다산기지 주변 후기 고생대층 주상도 작성	0.3	<ul style="list-style-type: none"> · 다산기지 주변 주요 후기고생대 단면 정밀주상도 작성 	100
		3-2. 완죽동물, 태형동물, 산호 화석 채취		<ul style="list-style-type: none"> · 신규산호화석 산출지 조사, 기존 산호 화석에 대한 재동정 	
		3-3. 스피츠베르겐섬 전 기고생대 연구지 답사		<ul style="list-style-type: none"> · 다양한 시대의 지층 답사 및 원 거리 조사 역량 확보 	
	4. 스피츠베르겐섬 제4기 화산암과 맨틀포획암 지질조사	4-1. 스피츠베르겐섬 제4 기 화산암과 맨틀포획 암 지질조사 4-2. 제4기 알칼리 화산 암과 맨틀포획암 암석 학적 특성 기재	0.2	<ul style="list-style-type: none"> · 북동 스피츠베르겐섬의 4기 화산암체(Sverrefjell) 현장조사 · 화산암체 모현무암 시료(5점) 및 다수의 맨틀 포획암 시료채취(약 60여개) · 현무암 시료와 맨틀포획암 시료 박편제작(30% 완료) 	95
	5. 북극정보센터 홈페이지개발	5-1. 홈페이지 개발	0.1	<ul style="list-style-type: none"> · 홈페이지 개발 	100
계		1.0			97.3

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성을(%)				
구분	연차별 달성내용			연차별 계획대비 연구실적 달성을(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	
2년차 (2015)	1. 중앙로벤빙하 후퇴 지역 토양유기탄소 분석 및 식생분포 지도 제작	1-1. 토양의 이화학적 특성 분석	0.45	- 토양 유기탄소 분석 644점 완료 - 토양 pH, 전기전도도, 토성 분석 및 가비중 계산 완료 - 주요 원소(P, Na, K, Mg, Ca) 분석 완료 - 식생자료와 환경자료 이용 빙하 후퇴지역 내 식생지도 1건 작성
		1-2. 식생지도 작성		- 식생자료와 환경자료 이용 빙하 후퇴지역 내 식생지도 1건 작성
	2. 중앙로벤빙하 후퇴 지역 CO2 플럭스 측정 테스트	2-1. 빙하 후퇴지역 이산화탄소 플럭스 관측을 위한 예비 실험	0.05	- 유기탄소량이 적은 토양에서 이산화탄소 플럭스 관측 시행
	3. 다산기지 주변 후기 고생대 층서 확립 및 고생태 연구	3-1. 다산기지 주변 후기 고생대지층 주상도 작성 및 시료채취	0.35	- 다산기지주변 현장조사를 통해 신규단면 조사, 추가 주상도 및 추가 시료확보 - 완족동물 분류 및 진화에 대한 논문 2편 채택 및 인쇄 중 - 석회암 산처리를 통한 새로운 화석동물군 발견
		3-2. 화석시료 전처리 및 형태 특성 연구		- 헬리콥터를 이용 스발바르 중부 현장조사 실시
		3-3. 스발바르 층서연구 주요지역 예비 답사		- 다산기지 인근 상부고생대층과 연계된 지층 중점조사
		3-4. 그린란드 고생대층 조사를 위한 국제 네트워크 구축		- 그린란드 화석군 전문가 Dr. Vinther 초청 세미나 및 연구 협의
	4. 스피츠베르겐 제4기 화산암 및 맨틀포획암 지구화학 특성 및 성인규명	4-1. 스피츠베르겐 제4기 화산암과 맨틀포획암 암석·광물·동위원소 특성 연구	0.15	- 스피츠베르겐 스페르피엘 화산체 맨틀포획암 광물·암석학적 특성 기재 - 맨틀포획암 전암, 광물 및 Sr-Nd-Pb 동위원소 분석
		4-2. 성인모델 수립		- 스페르피엘 맨틀포획암의 지구화학특성 해석을 통한 스피츠베르겐 맨틀 메타소마티즘 규명
		4-3. 그린란드 초염기성 암 카보나타이트 복합체 공동연구 네트워크 구축을 통한 시료 확보		- 그린란드 퀘퀘르삭 카보나타이트 5점 시료 확보
		계	1.0	100

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성을(%)				
구분	연차별 달성내용			연차별 계획대비 연구실적 달성을(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	
3년차 (2016)	1. 토양 유기탄소 지도 작성과 미생물 군집 조사	1-1. 토양 유기탄소 지도 작성	0.45	- 토양 유기물 정량 분석 - 토양 유기탄소 지도 작성
		1-2. 다양한 환경인자를 고려한 미생물 군집 구조 분석		- 중앙로벤빙하와 동로벤빙하 미 생물 군집구조 분석
	2. 빙하 후퇴 지역 대기 구성물질 분석 (현장연구 및 CO ₂ 농도 측정)	2-1. 빙하후퇴지역 대기- 토양 온실기체 교환 현장연구 수행	0.05	- 유기탄소량이 적은 토양에서 이 산화탄소 플러스 관측 시행
		2-2. 현장 포집 기체의 이산화탄소 가스 농 도 측정		- 현장 포집 기체의 이산화탄소 가스 농도 측정
	3. 다산기지 주변 고생대 고환경 복원	3-1. 다산기지 주변 후기 고생대 고환경 복원 모델 제시	0.35	- 다산기지주변 현장조사를 통해 신규단면 조사, 추가 주상도 및 추가 시료확보 - 스발바르 고생대 삼엽충을 이용 한 절지동물 머리 구조 규명 논 문 출판중(Park et al., in press)
		3-2. 다산기지주변 <지질- 생태 탐사 가이드 지 도> 발간		- 지질생태 가이드지도 발간(12월 예정)
		3-3. 그린란드 고생대총 탐사		- 경비행기 이용 그린란드 북부현 장조사 실시 - 북그린란드 화석산지 탐사 및 주상도 작성, 암석시료 획득
	4. 스피츠베르겐 맨틀진화 연구	4-1. 스피츠베르겐 암석 권 맨틀 온도 압력 조건 추정	0.15	- 스피츠베르겐 암석권 맨틀 온도 압력 조건 추정을 위한 광물 조성분석(EPMA)
		4-2. 스피츠베르겐 맨틀 교대작용 특성규명		- 맨틀 교대작용 특성규명을 위한 동위원소분석(TIMS), 광물 미 량원소 분석(LA-ICPMS)
계		1.0		100

다. 대외기여도

(1) 과학 분야

- (가) 고위도 북극에서 빙하 소멸로 새롭게 드러난 육상 생태계의 변화 메커니즘 규명에 기여
- (나) 브뢰기 반도 빙하소멸 지역의 토양 환경 및 미생물 생태환경 변화 메커니즘 규명

(2) 사회/경제적 분야

- (가) 본 연구 과제를 기반으로 국제공동연구를 주도적 추진함으로써 국가역량 강화에 필요한 북극 연구네트워크 구성 및 북극권 국가와 연구 협력 기반 마련
- (나) 본 연구 과제를 다산과학기지를 대표할 육상 생태계 연구로 니알슨 과학기지촌에 제시하고 NySMAC Flagship 프로그램에 주도적으로 참여
- (다) 본 연구에서 도출된 결과는 향후 북극에 대한 자원 개발 추진 시 스발바르 조약으로 확보된 우리나라의 경제적 활동을 지원할 기초 자료로 활용

(3) 정책 분야

- (가) 북극정책기본계획과 시행계획에 제시된 ‘북극다산기지 기반 연구·활동 확대’에 대한 성과에 기여
- (나) 북극이사회 지원 프로그램인 SAON 등에서 우리나라 연구활동으로 소개함으로써 국가 정책 수행에 기여



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

가. 연구개발결과의 국제 사회 활용 방안

- 스발바르 조약으로 확보된 우리나라의 경제적 활동을 지원할 수 있도록 본 연구에서 도출된 결과를 스발바르의 환경, 생태, 지질 특성 자료로 제공
- 스발바르 관련 국제네트워크(NySMAC, SSF 등)에서 연구 결과 발표
- 본 연구를 토대로 니알슨 기반 육상 모니터링 분야(Terrestrial Flagship) 지속 참여
- 본 연구 결과를 토대로 북극이사회와 북극과학위원회가 공동 수행하는 SAON (지속 가능한 북극 관측 네트워크)에 북극 모니터링 활동 보고
- 향후 북극에 대한 자원개발 개방 및 추진 시 우리나라의 기득권 확보를 위한 기초 자료로 활용
- 본 과제에서 개발한 <북극지식센터>는 정부, 학계, 교육계, 언론, 산업계를 비롯하여 북극 관련 정보를 필요로 하는 누구나 쉽게 자료를 찾아 볼 수 있는 북극 종합 정보 창구로 활용



나. 연구개발결과의 추후 연구 활용 방안

- 빙하후퇴로 인한 새롭게 노출된 지역이 온실기체의 저장원인지 아니면 공급원인지 파악함으로써 이 지역에서의 기후변화 피드백(되먹임) 기작을 이해하는데 활용
- 빙하가 녹으면서 생성된 용융수가 연안 생태계에 미치는 영향을 조사함으로써 육지 빙하와 육상생태계에서 유입된 토양 입자와 미생물이 해양 생태계에 미치는 영향을 파악하는데 활용
- 극지역 빙하 소멸지역에서 토양 호흡에 영향을 주는 주요 인자를 파악하여, CO₂, CH₄ 등의 온실기체 방출에 관한 모델수립에 기초 자료로 활용
- 브뢰기 반도 빙하들의 기반암 특성을 규명함으로써 이에 따른 토양환경 및 미생물 생태환경의 차이를 규명하는데 활용
- 빙하 소멸지역 토양 미생물 상의 연중 계절적 변화를 조사함으로써, 기존에 단일 시즌 조사로는 해답을 찾는데 한계가 있었던 토양 미생물 군집의 변화양상과 변화 메커니즘 이해하는데 활용
- 빙하 소멸지역으로 유입되는 미생물 선구종들의 유입경로와 안착 이후의 생존 및 증식양상에 대한 연구를 통해서, 빙하가 사라지면서 새롭게 노출된 지역에서 발생하는 생물학적 천이의 초기 발생 메커니즘 이해하는데 활용
- 또한, 이러한 연구결과는 미생물 생태학 분야에서는 여전히 논란 속에 있는 분산한계(dispersal limitation)나 선점효과(priority effect) 등과 같은 생태학적 가설에 대한 증거자료로 활용
- 기존에 단일 사이트에서 수행되었던 연구를 브뢰기 반도로 확장해 여러 사이트들과의 비교연구를 수행함으로써, 빙하후퇴에 따른 토양 미생물 상의 지역간 천이양상 차이를 이해하고 이는 향후 빙하 소멸지역 육상 생태계 변화 모델링에 중요한 파라미터로 적용

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 스발바르 정책

- 노르웨이와 일관되고 확고한 집행 주권
- 스발바르 조약의 준수 및 조약 준수 확인
- 진정과 안정성의 유지 보수
- 보존 지역의 자연 고유의 황야
- 노르웨이 제도의 사회의 유지 보수

가. 스발바르 정책에 꾸준한 과정

노르웨이 의회에 보고서의 목적은 기준선과 향후 스발바르의 정책을 세우 것이다. 그들은 이 군도에 안정적이고 예측 가능한 권위와 사회 이익을 개발을 할 것이다. 동시에 새로운 도전을 극복하며 그 때의 가장 적합한 정책 수단을 사용하여 이 군도를 관리하는 것 이다.

나. 확실한 환경 프로필

이 지역의 독특한 자연 야생을 보존이 노르웨이의 스발바르 정책의 주목표 중에 하나이며 자연 환경의 보호도 정책의 중요하다고 판단한다.

다. 스발바르 및 High North 전략

고위도 북극이 전략 우선순위에서 정부에게 가장 중요하다. 스발바르는 고위도 북극에 핵심 부분이며 스발바르의 보고가 정부의 고위도 북극 전략의 중요한 요서이다. 스발바르에 적합하고 효율적인 지도로그들의 존재를 고위도 북극에서 영향을 확정한다.

라. 기후 변화의 도전과 기회

기후변화는 새로운 도전을 만든다. 북극에서는 온도가 지구평가 보다 두 배 더 오를 예상이다. 이에 따라 환경 변화를 유도하며 스발바르의 생태계에 있는 많은 종들에게 심각한 결과가 있을 수 있다. 동시에 기후변화로 인해서 기회와 북극 지역의 활동을 더 주어진다. 따듯해지는 북극해 통해 어장 활동이 북쪽으로 이동할 수도 있다.

해빙이 없어지면서 국제 항로가 구성될 수도 있다. 예를 들어, 극지 해양의 구조 작업 및 오염 정화 작업의 거점으로 롱이어비엔이 더 중요한 기반이 될 수도 있다. 현재에 스발바르 인공위성 기지에서 얻는 위성 자료로 해빙 상태를 모니터링하며 석유 유출 및 선박 교통을 감시한다. 또한 롱이어비엔은 선박 교통을 감시 하는 것 보도 극지방에서 더 중요한 역할 할 것이다.

마. 정상화 - 규제 증가 필요

정부는 본토에 있는 법적인 규정 있듯이 스발바르도 필요하다고 강조한다. 왜냐하면, 많은 경우에 롱이어비엔이 본토 지역의 사회의 방향으로 개발한다. 그래도 특별한 상황이 발생하며 사례별로 대한이 필요성이 있으며 법이 스발바르에 어떻게 적용 하는지에 판단력이 필요할 것이

다. 예를 들어, 복지 및 자격 법안에 평가가 스발바르 조약을 반영하여 이 군도의 거주 대한 평등을 한다. 롱이어비엔은 본토와 같은 수준에서 지역 사회 및 “요람에서 무덤까지” 서비스를 제공하지는 않을 것이다.

바. 스발바르와 과학 연구

스발바르는 온도 상승으로 북극 지역의 영향 대한 데이터 수집하는 중요한 지역이다. 그리하여 스발바르가 노르웨이에서 이런 기회들을 최대한 활용하여 국제 기후 및 환경연구의 중요성을 보여준다. 롱이어비엔에서 대학 센터(UNIS)를 설립하여 교육 제공을 높였다. UNIS는 롱이어비엔 사회의 중요하게 발전했다. 게다가 뉘올레순에 킹스베이 AS 그리고 노르웨이 극지연구소도 인프라에 상당한 투자를 했다. 앞으로 롱이어비엔과 뉘올레순 지역들에서는 자연스럽게 연구와 교육의 출발점이 될 것이다 왜냐하면 독특한 장점들이 있다. 스발바르 인프라를 효율적으로 사용하며 기관들 사이의 협력 강화를 하는 게 매우 중요하다. 국제 극지 관측의 해(IPY 2007-2009)와 스발바르의 연구 활동을 강화할 필요성 있다. IPY의 유산을 반영하며 제일 좋은 방법으로 협력하는 게 핵심이다.

사. 석탄 광산 및 기타 산업 활동

스발바르 정책의 주요 목표 중에 하나는 노르웨이 사회를 유지하는 것이다. 가족 공동체가 존재하는 이유는 롱이어비엔에 이 목표를 충족하기 위해 있다. 정부는 고품질인 가족 공동체를 롱이어비엔에 추진한다. 석탄 광산은 이 공동체에 중요하다. 정부가 판단하기엔 석탄 광산은 환경법과 상업 수익성에서 세운 엄격한 틀 내에서 계속 진행하는 것을 추구한다. 기존 인프라를 석탄 광산에 최대로 이용하여야 한다. 하지만 석탄 광산은 지속가능하지 않다. 또한 석탄 가격변동에 취약하다. 뜻하지 않은 일이 또 발생하여 업무를 수행할 수 없을 수도 있다. 이에 따라 정부는 다른 활동을 개발할 필요가 있다.

아. 관광업

현재 광관광도 롱이어비엔 여려 활동 중에서도 중요하다. 관광업으로 북극의 환경 문제들을 널리 퍼지게 도움 된다. 정부는 스발바르에 관광업을 엄격한 환경 안전 틀 속에서 개발 할 예정이다.

자. 자연의 보호

스발바르의 독특한 자연 야생을 보존하는 게 스발바르 정책의 주요 목표 중에 하나다. 지난 10년간 활동에 의해 스발바르의 교통이 서서히 상승했다. 선박 교통 관광 및 연구의 성장이 가장 빠르다. 스발바르의 지질학적 식물학적, 문화적 유적의 압박을 제한하기 위하여 교통량을 통제 할 필요가 있다. 특히 스발바르 동쪽에 자연 보호 구역에 이것은 중요하다 왜냐면 기후 연구에 중심인 곳이라고 예정한다.

해양 안정성을 향상 시키는 데 더 많은 노력이 필요하다. 환경 보호 규제 위해 관리 계획과 수 정이 교통과 환경에 가는 압박을 제안 할 수 있다. 효과적인 대책을 마련하기 위에서는 교통이 스발바르 환경에 무슨 영향을 끼치는지에 지식을 더 풍부하게 알아야 된다.

Report to the Storting on Svalbard: Svalbard policy entering a new era

The overarching objectives of Svalbard policy are:

- Consistent and firm enforcement of Norwegian sovereignty
- Correct adherence to the Svalbard Treaty and verification of compliance with the Treaty
- Maintenance of calm and stability
- Preservation of the area's unique natural wilderness.
- Maintenance of Norwegian communities in the archipelago

There is broad political agreement on these objectives, which have remained firm for a long time. History has shown that administering the archipelago according to these objectives has been a success.

A steady course for Svalbard policy

The aim of the Report to the Storting is to set guidelines for Svalbard policy for a number of years going forward. They envision a continued stable and predictable exercise of authority and beneficial social developments in the archipelago. At the same time it is important to retain the necessary manoeuvring room in order to meet new challenges and employ the policy instruments most suitable at any given time in administering the archipelago.

A clear environmental profile

Preserving the area's unique natural wilderness is one of the main objectives of Norway's Svalbard policy, and protection of the natural environment is one of the key policies. Svalbard's uniqueness is something that the Government feels a great responsibility for protecting.

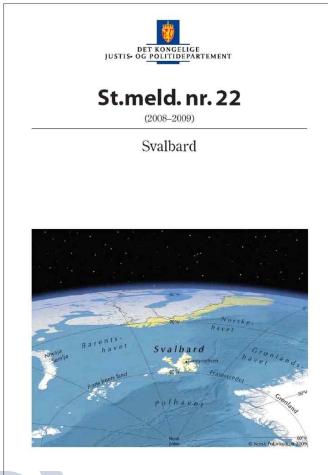
Svalbard and the High North strategy

The High North is this Government's most important strategic priority. Svalbard is a key part of the High North, and the Svalbard report is a crucial addition to the Government's High North Strategy. Continued effective and appropriate administration of Svalbard will help to strengthen and expand our presence in the High North.

Climate change – challenges and opportunities

Climate change will present new challenges. Temperatures in the Arctic are expected to rise twice as fast as the global mean.

This may lead to sweeping changes in the physical environment and have serious consequences for species and ecosystems in Svalbard.



At the same time, climate change presents opportunities and expectations of increased activity in the north. A warmer Arctic Ocean will mean that fisheries activities will move northward.

Less ice may also open up new routes for international shipping between east and west. For example, Longyearbyen may become increasingly important as a base for rescue and pollution clean-up operations in the polar oceans. Even now, satellite data obtained by the Svalbard Satellite Station is used in operational monitoring of sea ice conditions, oil spills and ship traffic, and there is reason to believe that Longyearbyen may become an even more important platform for monitoring ship traffic in the polar basin.

Normalisation – increased need for regulation

The Government emphasises that the legal framework for Svalbard is to be as much like that on the mainland as pos-

FAKTAARK



sible. A number of circumstances, especially the fact that Longyearbyen is developing in the direction of similar local communities on the mainland, make this desirable. Even so, special circumstances mean a need for case-by-case assessment of whether and in what way laws are to apply to Svalbard. For example, welfare and entitlement legislation will have to be assessed in light of the Svalbard Treaty's establishment of equal rights to access and residence in the archipelago by citizens of parties to the treaty. And Longyearbyen is not intended to be a "cradle-to-grave" community or offer services on the same level as mainland municipalities.

Svalbard and scientific research

Svalbard has become a key area for gathering data on what happens when temperatures in the Arctic rise and how this may impact the global climate. This underscores the importance of making full use of the opportunities afforded by Svalbard as a platform for Norwegian and international climate and environmental research.

In Longyearbyen the establishment of the University Centre in (UNIS) has helped to boost educational offerings. UNIS has also developed into an increasingly important part of the local community in Longyearbyen. In addition there are the activities of such institutions as Kings Bay AS in Ny-Ålesund and the Norwegian Polar Institute as well as substantial investment in infrastructure. Going forward, Longyearbyen and Ny-Ålesund will also be the natural points of departure for research and instruction based on the unique advantages of the archipelago. It is crucial to ensure that the infrastructure in Svalbard is used efficiently and to enhance the collaboration between institutions.

Efforts connected with International Polar Year (IPY 2007-2009) have strengthened Svalbard as a research platform. Managing the legacy of IPY in the best possible manner is a key challenge.

Coal mining and other industrial activity

One of the main objectives of Svalbard policy is to maintain Norwegian communities in the archipelago. The existence of a family community in Longyearbyen fulfils this objective.

The Government attaches importance to Longyearbyen continuing to be a high-quality family community. Coal mining continues to be the mainstay of this community. It

is the Government's assessment that coal mining should continue within the strict framework set by environmental legislation and commercial profitability, in a manner that supports Store Norske's objective contribute to a robust community in Longyearbyen. Existing infrastructure for coal mining activities should be used as much as possible.

At the same time, coal mining is not a sustainable activity. It is also vulnerable to fluctuations in the price of coal. Unforeseen events may have a serious impact on operations. In view of this, the Government believes that an effort should be made to develop other activities, such as knowledge, research and teaching as well as tourism and other varied activities.

Tourism

Today, the tourism industry is an important basis for settlement and activity in Longyearbyen, and a targeted effort on more year-round offerings may boost the importance of this business. Tourism also helps to spread knowledge of the vulnerable environment and environmental challenges in the Arctic. The Government also wants to facilitate development of tourism as a basic industry in Svalbard, within a strict environmental safety framework.

Protecting the wilderness

Preserving Svalbard's unique natural wilderness is one of the main objectives of Norway's Svalbard policy. Total traffic in Svalbard has risen in step with the increase in activities in the past decade. Growth has been fastest in ship traffic, tourism and research. To limit the strain on Svalbard's geological, botanical and cultural monuments, traffic needs to be controlled in a manner in conformance with the value and vulnerability of – and reasons for preserving – the various areas. This pertains especially within the nature reserves in eastern Svalbard, which will assume increasing importance as reference areas for climate research going forward.

The further effort to improve marine safety will be an important task for the Government. The formulation of management plans and amendments to the environmental protection regulations will be key instruments for controlling traffic and limiting the overall strain on the environment in keeping with the objectives of the regulations. In order to implement effective measures it is vital to continue the effort to increase our knowledge of how traffic impacts the environment in Svalbard.

2. 노르웨이의 뉘올레순 연구 정책

가. 뉘올레순의 새로운 추동력

노르웨이 정부는 스발바르에 대한 새로운 백서에서 뉘올레순 지역에서 수행되는 연구 활동의 틀(framework)을 변경한다고 밝혔다. 앞으로 뉘올레순의 연구 활동 운영과 조정하는 역할을 기후환경부(Climate and Environment Ministry)가 담당할 예정이다.

뉘올레순은 1964년에 국제적인 북극 연구와 환경 관측의 중심지로서 세워졌다. 노르웨이 극지 연구소(Norwegian Polar Institute)는 이 지역에 연구 기지를 설립한 기관들 중 하나이다. 뉘올레순은 특별한 자연환경과 위치, 오래된 극지 전통과 좋은 접근성을 갖추어 기후 환경 연구 지역으로 많은 관심을 받아 왔다. 기후환경부 장관 Vidar Helgesen는 뉘올레순이 앞으로도 계속해서 국제 과학 협력을 위한 장의 역할을 할 것이며 노르웨이는 전문 지식과 리더십을 가지고 명확한 호스트 역할을 맡을 것이라고 말했다.

나. 뉘올레순 광범위한 연구

뉘올레순의 옛 광산 마을에 연구자들은 노르웨이와 여러 나라가 연구기지를 설립했다. 노르웨이 정부가 지금 이 시점에서 변화를 의도하는 이유는 노르웨이의 주최자 역할과 연구 조정 활동을 강화하고자 하기 때문이다.

Helgesen 장관은 “노르웨이 극지연구소는 극지에 대한 노르웨이의 관심을 보호하기(safeguard) 위한 주요 기관이다. 국제적으로 인정받고 있는 주 연구기관이므로 뉘올레순에서 수행해야 할 역할을 감당하기에 최고의 자격을 두고 있는 기관”이라고 말했다.

다. 뉘올레순에서 새로운 연구 전략

노르웨이 연구 위원회(Norwegian Research Council)는 중요한 연구의 우선순위에 대한 기본틀(framework)을 제공해야 한다. 뉘올레순은 독특한 연구 기회를 제공하고 있다. 그러므로 연구 결과의 질, 협력, 개방적인 공유가 중요하다.

라. 소유권 이전

노르웨이 극지연구소는 기후환경부 밑에 있는 부서이며 뉘올레순에 기지를 두고 있다.

Helgesen 장관은 노르웨이 극지연구소가 연구 전략에 따르는 기지 운영을 조정할 것이기 때문에, 정부의 소유인 Kings Bay AS의 관리 책임이 산업수산부(Industry and Fisheries Ministry)에서 기후환경부로 이양하는 것이 타당하다고 말했다. 이것은 뉘올레순에 대한 전반적인 목표와 전략에 따르는 책임을 명확하게 하는데 도움이 될 것이다. 킹스베이의 소유권 이양은 2017년 1월 1일 실행될 예정이다.

킹스베이는 뉘올레순에서 수십 년 동안 연구 커뮤니티를 구축하는 역할을 수행해 왔다. 경제장관 Monica Maeland는 “킹스베이는 자랑스러운 산업 전통을 상징하는 동시에 이 회사의 사명이 연구를 촉진하는 것이기 때문에 킹스베이의 소유권이 내가 속한 산업수산부에서 기후환경부로 이양되는 것이 한편으로는 아쉽다. 이러한 변화를 통해 전체 목표에 따르는 책임이 한 곳에 집중될 것이다”고 말했다.

English translation:
Report to the Parliament No. 32

A new impetus for Ny-Ålesund

news | Date: 11/05/2016

In the new white paper on Svalbard, the Government proposes to change the framework for research activities in Ny-Ålesund. The Climate and Environment Ministry will take over responsibility for the operation and daily coordination in Ny-Ålesund.

Since 1964 Ny-Ålesund is built up as a center of international Arctic research and environmental monitoring. Norwegian Polar Institute are among the many institutions that have research stations on site.

Unique nature and location, long polar traditions and good accessibility make Ny-Ålesund attractive for climate and environmental research.

- Ny-Ålesund will continue to be a platform for international scientific cooperation in the world. Norway has had a clear host role with professional expertise and leadership. This will continue, says Climate and Environment Minister Vidar Helgesen.

Extensive research in Ny-Ålesund

In the old mining town of Ny-Ålesund a research community has developed with a number of Norwegian and foreign institutions. The reason that now changes are made, is that the Government wants to strengthen the Norwegian hosts and the research coordinating activities.

- Norwegian Polar Institute is the state's main body to safeguard Norwegian interests in the polar regions. They are a central research organization with great legitimacy internationally. The institute has the best qualifications to fill their role in Ny-Ålesund in a good way, says Vidar Helgesen.

New research strategy for Ny-Ålesund

Responsibility for the operation in Ny-Ålesund should be seen in connection with the follow-up of a research strategy for Ny-Ålesund, which the Research Council shall be responsible for.

- The Norwegian Research Council should provide the framework for the overarching research priorities. Ny-Ålesund provides unique research opportunities. Therefore, quality, collaboration and open sharing of results is important in this work, says Minister Torbjørn Roe Isaksen.

Ownership is transferred

Norwegian Polar Institute is a directorate under the Climate and Environment Ministry, and is present in Ny-Ålesund.

- Since the institute will coordinate the operational follow-up of the research strategy, it is natural that the responsibility for managing the State's ownership of Kings Bay AS is transferred from Industry and Fisheries Ministry to Climate and Environment Ministry, says Helgesen.

This will help to gather and clarify responsibility for following up the overall objectives and strategies of Ny-Ålesund. The transfer takes place on 1 January 2017.

- Kings Bay has in many decades done a fantastic job developing the research community in Ny-Ålesund. It is sad because the company represents a proud industrial tradition, but at the same time it is right now as the company's mission is to facilitate research, that the ownership of Kings Bay is now transferred from my ministry to the Climate and Environment Ministry. This way the responsibility for following up the overall objectives will be brought together in one place, says economics minister Monica Mæland.

related

[White Paper on the future policy for Svalbard \(Ministry of Justice\)](#)
[The white paper on Svalbard \(Meld. St. 32, 2015-2016\)](#)

Source:

<https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/ny-giv-for-ny-alesund/id2500406/>



High microbial activity on glaciers: importance to the global carbon cycle

ALEXANDRE M. ANESIO*, ANDREW J. HODSON†, ANDREAS FRITZ‡, ROLAND PSENNER‡ and BIRGIT SATTLER‡

*Bristol Glaciology Centre, School of Geographical Sciences, University of Bristol, Bristol, BS8 1SS, UK, †Department of Geography, University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK, ‡Institute of Ecology, University of Innsbruck, Technikerstrasse 25, 6020 Innsbruck, Austria

Abstract

Cryoconite holes, which can cover 0.1–10% of the surface area of glaciers, are small, water-filled depressions (typically <1 m in diameter and usually <0.5 m deep) that form on the surface of glaciers when solar-heated inorganic and organic debris melts into the ice. Recent studies show that cryoconites are colonized by a diverse range of microorganisms, including viruses, bacteria and algae. Whether microbial communities on the surface of glaciers are actively influencing biogeochemical cycles or are just present in a dormant state has been a matter of debate for long time. Here, we report primary production and community respiration of cryoconite holes upon glaciers in Svalbard, Greenland and the European Alps. Microbial activity in cryoconite holes is high despite maximum temperatures seldom exceeding 0.1 °C. *In situ* primary production and respiration in cryoconites during the summer is often comparable with that found in soils in warmer and nutrient richer regions. Considering only glacier areas outside Antarctica and a conservative average cryoconite distribution on glacial surfaces, we found that on a global basis cryoconite holes have the potential to fix as much as 64 Gg of carbon per year (i.e. 98 Gg of photosynthesis minus 34 Gg of community respiration). Most lakes and rivers are generally considered as heterotrophic systems, but our results suggest that glaciers, which contain 75% of the freshwater of the planet, are largely autotrophic systems.

Keywords: carbon cycle, CO₂ sequestration, cryoconites, DOC, glaciers, net metabolism, photosynthesis, respiration

Received 25 February 2008; revised version received 29 July 2008 and accepted 30 July 2008

Introduction

Cryoconite holes are water-filled depressions (typically <1 m in diameter and usually <0.5 m deep) that form on the surface of glaciers when solar-heated inorganic and organic debris melts into the ice (Fig. 1). There is increasing evidence from clone libraries and microscopy studies that a highly diverse microbial community can be found on the surface of glaciers in features called cryoconite ('ice dust') holes, including viruses, bacteria and algae (Mueller *et al.*, 2001; Christner *et al.*, 2003; Porazinska *et al.*, 2004; Kastovska *et al.*, 2005; Anesio *et al.*, 2007), and also – depending on the geographic region – other organisms, such as tardigrades,

rotifers, nematodes, protozoa, copepods and insect larvae (Kohshima, 1984; De Smet & van Rompu, 1994; Kikuchi, 1994; Grøngaard *et al.*, 1999). More recent investigations have suggested that glaciers, ice sheets and ice shelves are neither sterile nor abiotic repositories of dormant cells. In fact, they support a large number of active microbial communities which sequester nutrients from the atmosphere (Tranter *et al.*, 2004; Vincent *et al.*, 2004; Hodson *et al.*, 2005). Cryoconite holes are particularly considered 'hot spots' for biogeochemical cycling upon the surface of glaciers throughout the Earth's cryosphere (Säwström *et al.*, 2002; Tranter *et al.*, 2004; Hodson *et al.*, 2005). For instance, it has been shown that microbial sequestration of NH₄⁺ is a major component of the annual nitrogen fluxes of the glacier surface, accounting for up to 50% of the atmospheric NH₄⁺ deposited in the winter snowpack

Correspondence: Alexandre Magno Anesio, tel. +44 117 331 4157, fax +44 117 928 7878, e-mail: a.m.anesio@bristol.ac.uk

© 2009 The Authors
Journal compilation © 2009 Blackwell Publishing Ltd

제 7 장. 참고문헌

- Ahlborn, M., Stemmerik, L., 2015. Depositional evolution of the Upper Carboniferous-Lower Permian Wordiekammen carbonate platform, Nordfjorden High, central Spitsbergen, Arctic Norway. Norwegian Journal of Geology 95, 91-126
- Ahn LY, Ji P, Park H (2009) Metal accumulation in sea urchins and their kelp diet in an Arctic fjord (Kongsfjorden, Svalbard). Mar Pollut Bull 58:1571 - 1577
- Amundsen, H.E.F., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., 1987. The lower crust and upper mantle beneath northwestern Spitsbergen: evidence from xenoliths and geophysics. Tectonophysics 139, 169 - 185.
- Anderson, K.D., Beauchamp, B., 2014. Paleobiology and paleoecology of Palaeoaplysina and Eopalaeoaplysina new genus in Arctic Canada. Journal of Paleontology, 88, 1056-1071.
- Beauchamp, B., Davies, G.R., Nassichuk, W.W., 1989. Upper Carboniferous to Lower Permian Palaeoaplysina-phylloid algal buildups, Canadian Arctic Archipelago. In: Geldsetzer, H.H.J., James, N.P., Thibault, G.E. (Eds.), Reefs: Canada and Adjacent Areas. Canadian Society of Petroleum Geology, Calgary, Alberta, pp. 631-637.
- Bernasconi, S. M.; Bauder, A.; Bourdon, B.; Brunner, I.; Bunemann, E.; Christl, I.; Derungs, N.; Edwards, P.; Farinotti, D.; Frey, B.; Frossard, E.; Furrer, G.; Gierga, M.; Goransson, H.; Gulland, K.; Hagedorn, F.; Hajdas, I.; Hindshaw, R.; Ivy-Ochs, S.; Jansa, J.; Jonas, T.; Kiczka, M.; Kretzschmar, R.; Lemarchand, E.; Luster, J.; Magnusson, J.; Mitchell, E. A. D.; Venterink, H. O.; Plotze, M.; Reynolds, B.; Smittenberg, R. H.; Stahli, M.; Tamburini, F.; Tipper, E. T.; Wacker, L.; Welc, M.; Wiederhold, J. G.; Zeyer, J.; Zimmermann, S.; Zumsteg, A., Chemical and Biological Gradients along the Damma Glacier Soil Chronosequence, Switzerland. Vadose Zone Journal 2011, 10, 867-883.
- Blomeier, D., Scheibner, C., Forke, H., 2009. Facies arrangement and cyclostratigraphic architecture of a shallow-marine, warm-water carbonate platform: the Late Carboniferous Ny Friesland Platform in eastern Spitsbergen (Pyefjellet Beds, Wordiekammen Formation, Gipsdalen Group): Facies 55, 291-324.
- Blythe, A.E., Kleinspehn, K.L., 1998. Tectonically versus climatically driven exhumation of the Eurasian plate margin, Svalbard: fission track analyses. Tectonics 17, 621 - 639.
- Breuninger, R. H., 1976. Palaeoaplysina (Hydrozoan?) Carbonate build-ups from upper Paleozoic of Idaho. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin 60, 584-607.
- Brey, G.P. & Köhler, T., 1990. Geothermobarometry in four-phase Iherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. J. Pet. 31, 1353-1378.
- Brown, S.P. and Jumpponen, A. 2014. Contrasting primary successional trajectories of fungi and bacteria in retreating glacier soils. Mol. Ecol. 23: 481-497.
- Buggisch, W., Joachimski, M., Lützer, H., Thiedig, F., Hüneke, H., 2001. Conodont stratigraphy of the Carboniferous and Permian strata from Brøggerhalvøya and Billefjorden Trough. Geologisches Jahrbuch B91, 637-689.
- Choi, S.H., Suzuki, K., Mukasa, S.B., Lee, J.-I., Jung, H., 2010. Lu - Hf and Re - Os systematics

- of peridotite xenoliths from Spitsbergen, Western Svalbard: implications for mantle – crust coupling. *Earth Planet. Sci. Lett.* 297, 121 – 132.
- Crane, K., Eldholm, O., Myhre, A.M., Sundvor, E., 1982. Thermal implications for the evolution of the Spitsbergen transform fault. *Tectonophysics* 89, 1 – 32.
- Davies, G.R., 1971. A Permian Hydrozoan mound, Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 973-988.
- Davies, G.R., Nassichuk, W.W., 1973. The hydrozoan? Palaeoaplysina from the upper Paleozoic of Ellesmere Island, Arctic Canada. *Journal of Paleontology* 47, 251-265.
- Dong, K., 2016. Soil fungal community development in a high Arctic glacier foreland follows a directional replacement model, with a mid-successional diversity maximum. *Scientific Reports* 6, Article number: 26360
- Eldholm, O., Myhre, A.M., Thiede, J., 1994. Cenozoic tectono-magmatic events in the North Atlantic: potential paleo environmental implications. In: Boulter, M.C., Fischer, H.C. (Eds.), *Cenozoic Plants and Climates of the Arctic: NATO ASI Ser*, 127. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 35 – 55.
- Fedorowski, J., 1981. Carboniferous corals: distribution and sequence. *Acta Palaeontologica Polonica* 26, 87-160.
- Flügel, E., 2004. Microfacies of carbonate rocks. Analysis, interpretation and application. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 976
- Goldstein, S.L., Soffer, G., Langmuir, C.H., Lehnert, K.A., Graham, D.W., Michael, P.J., 2008. Origin of a ‘Southern Hemisphere’ geochemical signature in the Arctic upper mantle. *Nature* 453, 89 – 93.
- Guelland, K., Hagedorn, F., Smittenberg, R.H., Göransson, H., Bernasconi, S.M., Hajdas, I. and Kretzschmar, R. 2013. Evolution of carbon fluxes during initial soil formation along the forefield of Damma glacier, Switzerland. *Biogeochemistry*, 113:545-561.
- Hanken, N.M., Nielsen, J.K., 2013. Upper Carboniferous – Lower Permian Palaeoaplysina build-ups on Svalbard: the influence of climate, salinity and sea-level. Geological Society, London, pp. 269-305.
- Hamilton, T.L., Peters, J.W., Skidmore, M.L. and Boyd, E.S. 2013. Molecular evidence for an active endogenous microbiome beneath glacial ice. *The ISME J* 7: 1402 – 1412.
- Hill, D., 1981. Rugosa and Tabulata. Treatise on invertebrate paleontology, Part F, Coelenterata, Supplement 1. Geological Society of America, Boulder, Colorado and University of Kansas Press, Lawrence, (762 pp.).
- Hüneke, H., Joachimski, M., Buggisch, W., Lutzner, H., 2001. Marine carbonate facies in response to climate and nutrient level: The Upper Carboniferous and Permian of central Spitsbergen (Svalbard): *Facies* 45, 93-136
- Ionov, D.A., Dupuy, C., O'Reilly, S.Y., Kopylova, M.G., Genshaft, Y.S., 1993. Carbonated peridotite

- xenoliths from Spitsbergen: implications for trace element signature of mantle carbonate metasomatism. *Earth Planet. Sci. Lett.* 119, 283 - 297.
- Ionov, D.A., O'Reilly, S.Y., Genshaft, Y.S., Kopylova, M.G., 1996. Carbonate-bearing mantle peridotite xenoliths from Spitsbergen: phase relationships, mineral compositions and trace-element residence. *Contrib. Mineral. Petrol.* 125, 375 - 392.
- Ionov, D.A., Bodinier, J.-L., Mukasa, S.B., Zanetti, A., 2002a. Mechanisms and sources of mantle metasomatism: major and trace element compositions of peridotite xenoliths from Spitsbergen in the context of numerical modeling. *J. Petrology* 43, 2219 - 2259.
- Ionov, D.A., Mukasa, S.B., Bodinier, J.-L., 2002b. Sr - Nd - Pb isotopic compositions of peridotite xenoliths from Spitsbergen: numerical modeling indicates Sr - Nd decoupling in the mantle by melt percolation metasomatism. *J. Petrology* 43, 2261 - 2278.
- Jackson, H.R., Johnson, G.L., Sundvor, E., Myhre, A.M., 1984. The Yermak Plateau: hot spot adjacent to a continental margin. *Journal of Geophysical Research* 89, 3223 - 3232.
- Johansson, Å., Gee, D.G., Larionov, A.N., Ohta, Y., Tebenkov, A.M., 2005. Grenvillian and Caledonian evolution of eastern Svalbard – a tale of two orogenies. *Terra Nova* 17, 317 - 325.
- Jones, M.H., Fahnstock, J.T., Stahl, P.D. and Welker, J.M. 2000. A Note on Summer CO₂ Flux, Soil Organic Matter, and Microbial Biomass from Different High Arctic Ecosystem Types in Northwestern Greenland. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 32:104-106.
- Kiessling, W., Flügel, E., Golonka, J., 1999. Evaluation of a comprehensive database on Phanerozoic reefs. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 83, 1552-1587.
- Kim, Y.H., J. Im, H.K. Ha, J.K. Choi, and S. Ha, 2014. Machine learning approaches to coastal water quality monitoring using GOFCI satellite data. *GIScience & Remote Sensing*, 51(2): 158-174.
- Krotov, P., 1888. *Geologicheskiy izsledovaniya na Zapodnom sklon Solikamskovo i Cherdynskagos Urala*. Trudy Geologicheskago Komiteta 6, 431-434.
- Kwon, H.Y., Jung, J.Y., Kim, O., Laffly, D., Lim, H.S. and Lee, Y.K. 2015. Soil development and bacterial community shifts along the chronosequence of the Midtre Lovénbreen glacier foreland in Svalbard. *Journal of ecology and environment*, 38:461-476.
- Larose, C, Dommergue, A. and Vogel, T.M. 2013. Microbial nitrogen cycling in Arctic snowpacks. *Environ. Res. Lett.* 8: 035004.
- Lazzaro A., R. Brankatschk,, Zeyer J. (2011). Seasonal dynamics of nutrients and bacterial communities in unvegetated alpine glacier forefields. *Applied Soil Ecology*. 53: 10-22.
- Lee, M.J., Lee, J.I., Kwon, S.-T., Choo, M.K., Jeong, K.-S., Cho, J.-H., Kim, S.-R., 2011. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of submarine alkali basalts recovered from the South Korea Plateau, East Sea. *Geosciences Journal*, 15(2), 149 - 160.
- Lee S. & Shi G. R., 2016. A preliminary phylogenetic study of late Palaeozoic spiriferoid brachiopods using cladistic and Bayesian approaches. *Palaeoworld*, 25 (1), 43-59.
- Lee S., Shi G. R., Park, H & Tazawa JI., 2016. Antitropicality and convergent evolution: a case

- study of Permian neospiriferine brachiopods. *Palaeontology*, 59 (1), 109-138.
- Lirman, D., 2000. Fragmentation in the branching coral *Acropora palmata* (Lamarck): growth, survivorship, and reproduction of colonies and fragments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 251, 41-57.
- Ludwig, P., 1989. Mittelkarbonische Beckenentwicklung auf der Brøggerhalbinsel (Svalbard): Sedimentologische Profilvergleiche und deren faciale und tektonische Deutung. *Polarforschung* 59, 79-99.
- Ludwig, P., 1991. The marine transgression in the Middle Carboniferous of Brøggerhalvøya (Svalbard). *Polar Research* 9, 65-76.
- Lønøy, A., 1995. A Mid-Carboniferous, carbonate-dominated platform, Central Spitsbergen, Norsk Geologisk Tidsskrift 75, 48-63

Moreau, M., Laffly, D., Joly, D. and Brossard, T. 2005. Analysis of plant colonization on an arctic moraine since the end of the Little Ice Age using remotely sensed data and a Bayesian approach. *Remote Sens. Environ.*, 99:244-253.

Nakatsubo, T., Bekku, Y., Kume, A., Koizumi, H. 1998. Respiration of the belowground parts of vascular plants: its contribution to total soil respiration on a successional glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Res.*, 17.

Nakazawa, T., UENO, K., Kawahata, H., Fujikawa, M., 2011. Gzhelian - Asselian Palaeoaplysina-microencruster reef community in the Taishaku and Akiyoshi limestones, SW Japan: implications for late Paleozoic reef evolution on mid-Panthalassan atolls. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 310, 378-392.

Nakatsubo, T., Bekku, Y., Uchida, M., Muraoka, H., Kume, A., Ohtsuka, T., Masuzawa, T., Kanda, H. and Koizumi, H. 2005. Ecosystem development and carbon cycle on a glacier foreland in the high Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. *J. Plant Res.*, 118:173-179.

Nowiński, A., 1991. Late Carboniferous to Early Permian tabulata from Spitsbergen. *Palaeontologia Polonica*, no. 51. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, (74 pp.).

Rime, T., Martin, H. and Beat, F. 2016. Potential sources of microbial colonizers in an initial soil ecosystem after retreat of an alpine glacier. *The ISME J. in press*

Saalmann, K. & Thiedig, F. 2002. Thrust tectonics on Brøggerhalvøya and their relationship to the Tertiary West Spitsbergen Fold-and-Thrust Belt. *Geological Magazine*, 139, 47 - 72.

Saalmann K. & Thiedig F. 2001. Tertiary West Spitsbergen Fold and Thrust Belt on Brøggerhalvøya, Svalbard: Structural evolution and kinematics. *Tectonics* 20 (6), 976-998.

Scrutton, C.T., 1990. Ontogeny and astogeny in *Aulopora* and its significance, illustrated by a new

- non-encrusting species from the Devonian of southwest England. *Lethaia* 23, 61-75.
- Schutte, U.M., Abdo, Z., Bent, S.J. Williams, C.J., Schneider, G.M., Solheim, B. and Forney, L.J. 2009. Bacterial succession in a glacier foreland of the High Arctic. *The ISME J.* 3: 1253 - 1268.
- Schutte, U.M., Abdo, Z., Foster, J., Ravel, J., Bunge, J., Solheim, B. and Forney, L.J. 2010. Bacterial diversity in a glacier foreland of the high Arctic. *Mol. Ecol.* 19: 54 - 66.
- Skjelkvåle, B.-L., Amundsen, H.E.F., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., Gjelsvik, T., 1989. A primitive alkali basaltic stratovolcano and associated eruptive centres, Northwestern Spitsbergen: volcanology and tectonic significance. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 37, 1 - 19.
- Stemmerik, L., Worsley, D., 2000. Upper Carboniferous cyclic shelf deposits, Kapp Kåre Formation, Bjørnøya , Svalbard: response to high frequency, high amplitude sea level fluctuations and local tectonisms, *Polar Research* 19, 227-249
- Talwani, M., Eldhom, O., 1977. Evolution of the Norwegian-Greenland Sea. *Geol. Soc. Am. Bull.* 88, 969 - 999.
- Tuchschmid, M., Spillmann, P., 1992. Neogene and Quaternary volcanism on Spitsbergen—the rival of an Arctic hot spot. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 72, 251 - 270.
- Vachard, D., Kavanov, P., 2007. Palaeoaplysinella gen. nov. and Likinia Ivanova and Ilkhovkii, 1973 emend., from the type Moscovian (Russia) and the algal affinities of the ancestral palaeoaplysinaceae n. comb. *Geobios* 40, 849-860.
- Wahlman, G.P., 2002. Upper Carboniferous – lower Permian (Bashkirian – Kungurian) mounds and reefs, In: Kiessling, W., Flügel, E., Golonka, J. (Eds.), *Phanerozoic Reef Patterns*. SEPM Special Publication 72, Tulsa, Oklahoma, pp. 271 - 338.
- Watkin, R., Wilson, E.C., 1989. Paleoecologic and biogeographic significance of the biostromal organism *Palaeoaplysina* in the Lower Permian McCloud Limestone, eastern Klamath Mountains, California. *Palaios* 4, 181-192.
- Welker, J.M., Fahnstock, J.T. and Jones, M.H. 2000. Annual CO₂ Flux in Dry and Moist Arctic Tundra: Field Responses to Increases in Summer Temperatures and Winter Snow Depth. *Clim. Change*, 44:139-150.
- Wells, P.R.A., 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.* 62, 129 - 139.
- Wookey, P.A., Bol, R.A., Caseldine, C.J. and Harkness, D.D. 2002. Surface Age, Ecosystem Development, and C Isotope Signatures of Respired CO₂ in an Alpine Environment, North Iceland. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 34:76-87.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여 서는 안 됩니다.